

Edición española de Scientific American
Noviembre 2015 InvestigacionyCiencia.es

EINSTEIN

LA RELATIVIDAD GENERAL Y LA REINVENCIÓN DE LA REALIDAD

ERRORES, CRISIS Y SUEÑOS DE UN GENIO

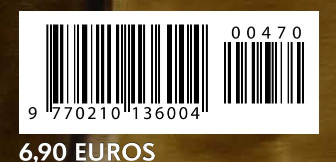
IMPACTO EN LA FÍSICA ACTUAL

BREVE HISTORIA DE LOS VIAJES EN EL TIEMPO

INCLUYE:

ARTÍCULO ORIGINAL DE A. EINSTEIN SOBRE LA TEORÍA UNIFICADA

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
100 AÑOS DE RELATIVIDAD GENERAL
NOVIEMBRE 2015 N.º 470



6,90 EUROS

100 AÑOS
DE RELATIVIDAD GENERAL

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Noviembre 2015, Número 470

$R_{\mu\nu}$ -

BERNARD LEE


5


44

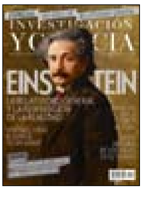

48

INVESTIGACIÓN
Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

El 25 de noviembre de 1915, Albert Einstein presentaba ante la Academia Prusiana de las Ciencias las ecuaciones definitivas de la relatividad general, una teoría que cambiaría para siempre la manera de entender el espacio y el tiempo. Cien años después, su obra sigue desempeñando un papel central en la comprensión del mundo físico. Este número repasa el pasado y el presente de una de las creaciones científicas más bellas e influyentes de todos los tiempos. Ilustración de Daniel Adel.



redaccion@investigacionyciencia.es



Junio 2015

RESPONSABILIDAD INFORMÁTICA

En su artículo «Sobrevivir en la ciberguerra» [Investigación y Ciencia, junio de 2015], Keren Elazari anima a los usuarios a tomar medidas para protegerse a sí mismos de los ataques informáticos. Pero, si el objetivo es que cada uno de nosotros se convierta en un experto en ciberseguridad, podemos dar la batalla por perdida.

Los usuarios carecemos del poder comercial necesario para «exigir a las compañías que mejoren la seguridad de sus productos», como sugiere Elazari. Las grandes empresas deberían estar sometidas a regulaciones que garantizasen que los datos privados no se almacenan sin encriptar y que no será fácil acceder a ellos. Toda infracción en materia de seguridad cometida por una compañía debería ser castigada con contundencia. Y cada vez que Microsoft permita que un programa malicioso se apodere de nuestro navegador, cada uno de nosotros debería tener derecho a demandar a la empresa y recibir como compensación simbólica algunos dólares.

Chuck Simmons
Redwood City, California

EL FIN DE LOS DINOSAURIOS

En «Orígenes de los tiranosaurios» [Investigación y Ciencia, julio de 2015], Stephen Brusatte analiza la extinción de los dinosaurios. ¿Qué hizo que estos animales fuesen tan vulnerables y acabasen extinguiéndose, mientras que los mamíferos sobrevivieron y prosperaron?

Peter Stephen

Responde Brusatte: *La extinción del fin del Cretácico es vista a menudo como una catástrofe que acabó con los dinosaurios y que no afectó a los mamíferos, lo que habría dejado vía libre a nuestros ancestros para ocupar el nicho de aquellos. Sin embargo, el proceso no fue tan simple. Algunos dinosaurios sí sobrevivieron: los pájaros. No obstante, hoy por hoy seguimos sin saber por qué algunas aves (aunque no todas) subsistieron, pero no así muchos dinosaurios con plumas y muy similares a los pájaros, como* Velociraptor *y su linaje.*

Por otro lado, aunque numerosos mamíferos resistieron, sobre todo aquellos de menor tamaño y con dietas más variadas, otros muchos sucumbieron. El Cretácico tardío representó el apogeo de los metaterios (cercanos a los marsupiales actuales), pero este grupo prácticamente desapareció por completo tras el impacto del asteroide que desencadenó la extinción de los dinosaurios. Más tarde, en el Paleógeno, fueron los mamíferos placentarios los que aprovecharon el nicho dejado por los metaterios. De esta manera acabaron convirtiéndose en la multitud de grupos que hoy nos son familiares, incluidos nuestros ancestros primates.

GLUONES RELATIVISTAS

En el artículo «Las enigmáticas propiedades de los gluones» [Investigación y Ciencia, julio de 2015], Rolf Ent, Thomas Ullrich y Raju Venugopalan escriben que «cuando los protones y los neutrones alcanzan velocidades extremas, los gluones de su interior empiezan a dividirse y a formar pares de gluones con una energía ligeramente inferior a la del progenitor».

¿No viola lo anterior el principio básico de la relatividad especial, según el cual las leyes de la física deberían ser idénticas para todos los observadores con independencia de la velocidad a la que se muevan? Consideremos el punto de vista de un físico diminuto subido a un protón, el cual se encuentra en una cámara de vacío rodeada por un tubo de metal que avanza a gran velocidad. Si de tanto en tanto nuestro pequeño investigador echa un vistazo al protón, verá siempre lo mismo (un protón ordinario en reposo). ¿Qué gluones son los que se están dividiendo, los que observa el físico diminuto o los que se ven desde fuera del tubo?

Charles M. Bagley, Jr.
Seattle

Responden los autores: *La teoría especial de la relatividad de Einstein se aplica también a la espuma cuántica de gluones y pares quark-antiquark que continuamente aparecen en el interior del protón. Como consecuencia, en un protón que se mueva a 0,99999 veces la velocidad de la luz, el tiempo de vida medio de dicha espuma cuántica se dilatará lo suficiente para que un observador provisto de un «femtoscopio de quarks y gluones» capte el proceso de subdivisión de estas partículas.*

Por el contrario, el pequeño físico que se mueve junto con el protón no podrá ver las fluctuaciones cuánticas, ya que estas tendrán una vida media demasiado breve con respecto a su reloj. Nuestro amigo permanecerá así inmune al hervidero cuántico de quarks y gluones que existe en el interior del protón (y de todos nosotros). Dado que dichas fluctuaciones existen en ambos sistemas de referencia, nada de lo que ocurre viola los postulados de la relatividad especial.



Julio 2015

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Apuntes

NEUROCIENCIA

El alzhéimer, ¿una enfermedad transmisible?

Un estudio plantea la posibilidad de que este y otros trastornos neurodegenerativos posean un origen semejante al de las enfermedades priónicas

En la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob, la versión humana de la encefalopatía espongiforme bovina (la «enfermedad de las vacas locas»), el cerebro se deteriora literalmente por la aparición de agujeros que abocan con rapidez a la demencia. La enfermedad causa la muerte en el plazo de un año en el 90 por ciento de los casos. Los responsables del mal son los priones, unas proteínas mal plegadas que contagian su conformación anómala a las proteínas normales y que van acumulándose en el cerebro. Es sabido que esas moléculas patológicas que se autopropagan provocan algunos trastornos cerebrales raros, como el kuru en Papúa Nueva Guinea. Pero cada vez más datos apuntan a su implicación en numerosos trastornos neurodegenerativos (si no en todos), entre ellos el alzhéimer, la corea de Huntington o el párkinson, caracterizados también por las agregaciones de proteínas deformes. Hasta hace poco no había indicios de que las proteínas anómalas de los afectados por estas enfermedades tan conocidas pudieran ser transmitidas directamente de una persona a otra. Pero el contenido del debate ha cambiado de repente este pasado septiembre con la publicación de una nueva investigación en *Nature* que aporta la primera pista de que la transmisión entre personas sería posible.



EL ALZHÉIMER (*abajo*) **destruye las neuronas de numerosas zonas del cerebro, entre ellas las responsables de la memoria.**

MAGGIE STEBER, GETTY IMAGES

En el estudio, John Collinge, neurólogo del Colegio Universitario de Londres, y sus colaboradores practicaron la autopsia a ocho pacientes de 36 a 51 años que habían fallecido a causa de la enfermedad de Creutzfeldt-Jakob. Todos la habían contraído a raíz del tratamiento con hormona del crecimiento que después se supo que se hallaba contaminada por priones. La sorpresa surgió cuando descubrieron que seis de los cerebros presentaban también indicios característicos del alzhéimer (agregados proteicos de amiloide beta, un signo diagnóstico de la enfermedad), aunque los pacientes eran demasiado jóvenes para manifestar síntomas.

Tales observaciones indican que las inyecciones de hormona contaminada podrían haber portado pequeñas cantidades de amiloide beta que desataron la formación de más proteínas similares. Ni el alzhéimer ni ninguna de las enfermedades priónicas humanas son contagiosas por contacto directo. Pero se tiene constancia de su transmisión a través de ciertos procedimientos médicos y, en el caso del kuru, del canibalismo. El nuevo estudio plantea la posibilidad de que el alzhéimer sea una enfermedad contagiosa con una etiología similar a la de las enfermedades priónicas.

El nuevo hallazgo es provocador, pero los expertos aconsejan prudencia a la hora de interpretar los resultados. El neurocientífico John Trojanowski, de la Universidad de Pensilvania, señala el pequeño tamaño de la muestra y la carencia de pruebas directas de la transmi-

sión que sustenten la causalidad. Pero si se acaba demostrando que el alzhéimer y otros trastornos neurodegenerativos comparten la misma vía y el mismo mecanismo patológico básico, los tratamientos podrían servir para todos.

«El contagio podría ser la causa en un porcentaje mínimo de casos», asegura Claudio Soto, catedrático de neurología del Centro de Ciencias de la Salud de la Universidad de Texas en Houston. «Pero lo más importante es conocer el principio en el que se basa, puesto que ello podría abrir nuevas puertas al diagnóstico y al tratamiento.» Investigadores como Soto y Collinge están intentando determinar el modo de detectar en los líquidos corporales los agregados de proteínas transmisibles que presumiblemente intervienen en el alzhéimer y en otras enfermedades neurodegenerativas, lo que podría suponer un avance en el diagnóstico.

La detección se antoja difícil. Un estudio publicado en línea el pasado septiembre en *Nature Neuroscience* por Mathias Jucker, de la Universidad de Tubinga, y sus colaboradores requirió métodos extremadamente sensibles para identificar los minúsculos agregados de amiloide beta, denominados «gérmenes», en cerebros de ratón [*véase* «Gérmenes de la demencia», por Lary C. Walker y Mathias Jucker; Investigación y Ciencia, julio de 2013]. Una reacción en cadena de proteínas tóxicas podría explicar el alzhéimer, el párkinson y otros trastornos mortales. Estos gérmenes tienen la capacidad de recobrar las propiedades patológicas tras permanecer en latencia hasta seis meses. Tales proteínas potencialmente priónicas podrían estar presentes en el cerebro mucho antes de la aparición de los síntomas, pero en niveles demasiado bajos para ser detectadas con los análisis ordinarios.

Una proteína potencialmente priónica podría causar varias enfermedades, según un estudio publicado este verano por el nóbel Stanley Prusiner, descubridor de los priones en los años ochenta del siglo xx [*véase* «Priones», por Stanley B. Prusiner; Investigación y Ciencia, diciembre de 1984]. Él y sus colaboradores hallaron que una variedad de alfa-sinucleína (la proteína mal plegada implicada en el párkinson) puede causar un trastorno neurodegenerativo similar pero raro, la atrofia multisistema. Saber cómo difieren en forma las variantes de estas proteínas y cómo influye la configuración en su naturaleza patógena será sin duda motivo de estudio en el futuro. «Hay indicios de que existen distintas variedades tanto de priones como de proteína amiloide beta, las cuales ejercen efectos biológicos muy dispares», afirma Lary C. Walker, de la Universidad Emory, que participó en el estudio de *Nature Neuroscience.* «Creo que entenderlo nos dará una visión más profunda de lo que está sucediendo en la enfermedad.»

A medida que se obtienen más pruebas, crecen también las sospechas de que los procesos de tipo priónico pueden estar detrás de todos los trastornos neurodegenerativos. Prusiner esperaba el actual cambio de pensamiento. En su discurso de aceptación del premio Nobel de 1997, predijo que el conocimiento de la formación de los priones podría «abrir nuevas vías para descifrar las causas y diseñar tratamientos contra las enfermedades neurodegenerativas más comunes, como el alzhéimer, el párkinson y la esclerosis lateral amiotrófica (ELA)».

—Diana Kwon

COMPORTAMIENTO ANIMAL

Monos que se automedican

Los colobos rojos comen corteza para curar sus males

Cuando un mono sufre un resfriado o jaqueca no tiene a su alcance un botiquín del que tomar algún analgésico. ¿Cómo se combaten entonces los resfriados o la tos en el reino animal?



CARLO BAVAGNOLI, GETTY IMAGES

La ecóloga Ria R. Ghai, de la Universidad de Georgia, y sus colaboradores han observado durante cuatro años a una banda de más de un centenar de colobos rojos en el Parque Nacional de Kibale, en Uganda, para averiguar si la selva provee de un equivalente al paracetamol.

Los monos infectados por tricocéfalos (vermes parásitos) pasan más tiempo descansando y menos moviéndose, acicalándose o copulando. También ingieren hasta el doble de corteza de árbol que los individuos sanos, aunque mantienen los mismos horarios de alimentación. Los hallazgos se publicaron en *Proceedings of the Royal Society B* el pasado septiembre.

El tentempié fibroso podría ayudar a barrer literalmente al intruso del tubo digestivo del simio, pero Ghai sospecha que hay una razón más convincente. Siete de los nueves tipos de árboles y arbustos preferidos por los monos enfermos tienen propiedades antisépticas o analgésicas. Eso hace pensar en que podrían estar medicándose, aunque no pueden descartarse otras posibilidades. Los simios enfermos recurren a las mismas plantas que los lugareños emplean para combatir sus dolencias, entre ellas la parasitosis por tricocéfalos. Y en opinión de la especialista, no parece mera coincidencia.

—Jason G. Goldman

VENENO SANADOR

Investigadores de la Universidad de Helsinki han anunciado la primera prueba de automedicación en hormigas. Cuando los biólogos expusieron a cientos de hormigas *Formica fusca* a un hongo nocivo, muchos de los insectos infectados optaron por consumir de un 4 a 6 por ciento de la solución de peróxido de hidrógeno facilitada para el experimento. Las hormigas sanas evitaron la sustancia doméstica, que en dosis pequeñas puede acabar con las infecciones pero por lo demás resulta mortal. Las enfermas que tomaron una parte tuvieron menos posibilidades de sucumbir al hongo. En la naturaleza, tal vez adquieran el compuesto devorando plantas que lo liberan como defensa contra los pulgones.

BIOTECNOLOGÍA

Ribosomas artificiales

Con la creación de estos orgánulos, las células sintéticas se hallan un paso más cerca de ser una realidad

Cada célula alberga una cuadrilla de «cocineros» que elaboran ingredientes para hacer posible la vida, basada en una vasta panoplia de proteínas. Ahora los científicos han creado un «chef» que cocina las recetas escritas en un ADN artificial para fabricar proteínas nuevas que puedan servir como antibióticos, biocombustible u otras moléculas útiles.

En el orden normal de las cosas, estos chefs, conocidos como ribosomas, están formados por dos piezas de ARN y aminoácidos que trabajan juntas brevemente para sintetizar las proteínas y, tras finalizar la tarea, siguen su camino por separado. El bioingeniero Michael Jewett, de la Universidad del Noroeste, y el biotecnólogo farmacéutico Alexander Mankin, de la Universidad de Illinois en Chicago, decidieron ensayar algo nuevo: engarzar las dos partes de su ribosoma sintético, Ribo-T, de modo tal que siguieran con el mismo juego de instrucciones novedosas. Hasta ahora no se conocía ninguna forma de vida terrestre, ya fuera natural o creada en el laboratorio, que dispusiera de ese ribosoma engarzado.

Resulta que el nuevo chef cocina igual de bien. Ribo-T ha sintetizado sin problemas proteínas verdes fluorescentes. Y bacterias *Escherichia coli* dotadas únicamente de tales ribosomas vivieron casi tan bien como sus congéneres naturales. Además, las *E. coli* han transmitido el Ribo-T a sus descendientes. «El artificio nos ayudará a entender mejor el funcionamiento de los ribosomas normales», explica Mankin.

De hecho, el estudio revela algo desconocido hasta ahora: los ribosomas no tienen que ser promiscuos para funcionar. Las dos unidades que se combinan y se separan pueden permanecer unidas permanentemente sin destruir la célula. Además, el ribosoma artificial puede cooperar con otro normal: mientras uno cocina las nuevas proteínas, el otro fabrica a destajo las enzimas necesarias para mantener viva la célula. La Agencia de Proyectos de Investigación Avanzados de Defensa de EE.UU. apoya el trabajo en su objetivo de hallar factorías vivientes de nuevos materiales, desde moléculas medicinales hasta biocombustibles más eficientes.

En los últimos años se han creado pares de bases que solo existen en el laboratorio, cromosomas reorganizados e incluso genomas sintéticos enteros. Hoy el juego de herramientas del biólogo sintético incorpora un ribosoma novedoso, un chef de diseño que cocina nuevos platos con ingredientes originales, como aminoácidos artificiales. Buen provecho. —*David Biello*



ASTROFÍSICA

Supernovas fallidas

Algunas estrellas que han desaparecido sin dejar rastro podrían haberse convertido en agujeros negros

En el relato de Sherlock Holmes *Estrella de plata*, el famoso detective resuelve un asesinato al reparar en algo que no ocurre: un perro guardián que no ladra en mitad de la noche. Ahora, tal vez los astrónomos puedan estudiar la formación de agujeros negros gracias a algo parecido: estrellas que no explotan.

Las estrellas mucho más masivas que el Sol suelen acabar sus días en forma de supernovas. Al ser tan brillantes, estas violentas explosiones estelares pueden observarse sin problemas desde la Tierra. Los astrónomos modernos aún esperan localizar una en la Vía Láctea, pero en los últimos años han podido presenciar varias docenas de ellas en otras galaxias. Sin embargo, ninguna de las estrellas progenitoras tenía una masa superior a 17 masas solares, a pesar de que los astros mucho mayores abundan en el universo.

Algunos teóricos sospechan que los responsables de esa falta de explosiones de estrellas muy masivas tal vez sean los agujeros negros. Cuando el núcleo de ciertas supergigantes rojas colapsa, el resultado podría ser un agujero negro que, acto seguido, engulliría a la estrella moribunda. En tal caso, la desaparición del astro estaría anunciando el nacimiento de uno de estos curiosos objetos. «Las denominamos "supernovas fallidas"», señala Stan Woosley, astrofísico de la Universidad de California en Santa Cruz que ha elaborado un modelo del proceso.

En 2008, Chris Kochanek y sus colaboradores de la Universidad estatal de Ohio propusieron un método para detectar esas escurridizas defunciones. A diferencia de los estudios sobre supernovas, que rastrean intensas explosiones de luz, Kochanek escudriñó unas 30 galaxias cercanas en busca de zonas oscuras en las que una estrella hubiese desaparecido de manera repentina. El año pasado, a partir de imágenes tomadas en el Observatorio del Gran Telescopio Binocular de Arizona, Kochanek, Jill Gerke y Kris Stanek anunciaron el hallazgo de una convincente candidata a supernova fallida: una supergigante roja en la galaxia NGC 6946 que resplandeció brevemente y después se esfumó.

El número de sospechosos ha ascendido ahora a dos. El pasado mes de julio, Thomas Reynolds, Morgan Fraser y Gerard Gilmore, de la Universidad de Cambridge, refirieron la desaparición de otra supergigante en un cúmulo estelar de la galaxia NGC 3021, un descubrimiento que fue posible gracias a las imágenes de archivo del telescopio espacial Hubble. Los resultados de ambos equipos han aparecido en sendos artículos publicados en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*.

Por supuesto, existen explicaciones más prosaicas para las misteriosas desapariciones estelares. Podría tratarse de estrellas variables con grandes fluctuaciones de brillo, o bien los astros podrían haberse ocultado tras nubes de polvo. Ahora los investigadores intentarán efectuar observaciones más detalladas con telescopios espaciales y, con ello, confirmar el proceso de formación de agujeros negros.

Lo mejor que podrían encontrar sería la nada más absoluta. «La defunción de una estrella se diferencia de otras fuentes de variabilidad estelar en que es para siempre», explica Kochanek. Si las estrellas reapareciesen, añade Frase, sería evidente que no han explotado, en cuyo caso la búsqueda de supernovas fallidas continuará o, al igual que las estrellas, se apagará hasta desaparecer.

—*Lee Billings*



LA GALAXIA ESPIRAL NGC 3021, a unos 100 millones de años luz de la Tierra, podría haber engendrado un agujero negro.

THOMAS FUCHS (*ilustración*); CORTESÍA DE ADAM RIESS; STScI, NASA Y ESA (*galaxia NGC 3021*)

INGENIERÍA ESPACIAL

Un sustituto para el plutonio

Una técnica para propulsar torpedos podría reemplazar las baterías nucleares

La NASA se enfrentó hasta hace poco a una escasez de plutonio que llegó a poner en peligro las misiones al espacio profundo. En 2013, el Departamento de Energía de EE.UU. anunció que, tras una pausa de 25 años, pondría de nuevo en marcha la producción de plutonio 238, el componente principal de las baterías nucleares de larga duración que han suministrado energía a numerosas misiones desde 1969. No obstante, el daño causado por la larga pausa ya estaba hecho. Para 2021, el nuevo programa solo habrá producido suficiente combustible radiactivo para fabricar dos módulos y medio de baterías nucleares al año. *Curiosity*, el vehículo de exploración en Marte, necesitó ocho módulos. Ese precario suministro, sumado a las pocas reservas existentes, apenas cubriría las necesidades de las misiones planificadas para la próxima década hacia destinos como los satélites helados de Júpiter y Saturno. Por esa razón, la NASA ha estado investigando posibles alternativas. Una de ellas, una técnica militar concebida en su día para propulsar los torpedos de la Marina estadounidense.

La Marina de EE.UU. ya experimentó con los sistemas de propulsión por energía química almacenada (SCEPS, en inglés) en los años veinte del siglo pasado, pero no fue hasta los años ochenta cuando los ingenieros de la Universidad estatal de Pensilvania adaptaron la técnica a cabezas explosivas a fin de que alcanzasen la velocidad y profundidad suficientes para perseguir a los submarinos soviéticos. Los SCEPS aprovechan la reacción química de dos reactivos con elevado contenido energético que permanecen almacenados y separados hasta su uso. En los torpedos, el sistema consta de un bloque sólido de litio y un tanque de hexafluoruro de azufre. Una vez activada, la reacción de combustión de las dos sustancias hace girar la turbina del arma y genera miles de kilovatios de potencia.

La versión de la NASA modificaría la receta. Michael Paul, ingeniero de sistemas espaciales en la Universidad de Pensilvania, ha propuesto una misión de demostración a Venus en la que un módulo de aterrizaje robótico provisto de SCEPS aprovecharía el dióxido de carbono atmosférico del planeta para la combustión del litio. El calor resultante accionaría un generador eléctrico y produciría la potencia necesaria para alimentar tres bombillas, una dotación adecuada para las misiones espaciales. (Los exploradores marcianos *Spirit* y *Opportunity* se bastaron con la potencia equivalente a la de una bombilla para sus misiones.) En julio, Paul recibió una financiación de medio millón de dólares a través del Programa de Conceptos Avanzados e Innovadores de la NASA para medir con exactitud el rendimiento de su diseño. También trabajará con científicos planetarios a fin de recomendar a la agencia otras posibles aplicaciones para misiones espaciales.

La energía nuclear sigue siendo insustituible en las misiones al espacio profundo con una duración prevista de años o décadas, como las de las sondas *Voyager*, *Cassini* o *New Horizons*, señala Ralph McNutt, del Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins y máximo responsable de un informe de la NASA sobre las reservas de plutonio fechado en julio pasado. Con todo, McNutt considera que los SCEPS constituyen una alternativa «emocionante».

Si la idea de Paul llega a buen puerto, la energía producida por los SCEPS podría mejorar las misiones que ya usan baterías nucleares o servir de apoyo a aquellas que transitan demasiado lejos del Sol y que, por tanto, no pueden aprovechar la luz del astro. Algún día la técnica podría propulsar vehículos robóticos diseñados para explorar cráteres lunares en sombra permanente, accionar el taladro de un módulo de aterrizaje en Marte en una región con poca iluminación o generar calor para mantener la temperatura de los componentes electrónicos de un robot en la helada Europa. Los SCEPS podrían incluso proporcionar toda la energía necesaria para misiones más cortas a destinos cercanos que durasen días o semanas en lugar de años.

—Jeremy Hsu



EL TORPEDO antisubmarino MK-50 emplea un sistema de propulsión química que la NASA podría adaptar a sus misiones espaciales.

CORTESÍA DE LA MARINA ESTADOUNIDENSE (*MK-50*); INSTITUTO GEOLÓGICO Y MINERO DE ESPAÑA (*mapa*)

AGENDA

CONFERENCIAS

12 de noviembre
Astronomía de neutrinos
Carlos Peña, Instituto de Física Corpuscular (CSIC-UV)
Museo de las Ciencias Príncipe Felipe
Valencia
www.cac.es/astronomia > Actividades

17 de noviembre
Alexander von Humboldt, el explorador del cosmos
Miguel Ángel Puig-Samper, Centro de Ciencias Humanas y Sociales (CSIC)
Ciclo «Exploradores, conquistadores, viajeros»
Fundación Juan March
Madrid
www.march.es > Conferencias

19 de noviembre
Relatividad general y teoría cuántica: de Einstein a Hawking
José Navarro Salas, Instituto de Física Corpuscular (CSIC-UV)
Ciclo «Arquitectura cósmica III. La gravitación einsteniana»
Fundación Valenciana de Estudios Avanzados, Valencia
www.fvea.es/actividades

EXPOSICIONES

***Hispaniae Geologica Chartographia*. La representación geológica de España a través de la historia**
Instituto Geológico y Minero de España
Madrid
www.igme.es



OTROS

10 de noviembre - Cine
En busca del fuego, J. J. Annaud
Ciclo «Cine y prehistoria: Ciencia y ficción de nuestros orígenes»
Sala de cine de la Universidad Autónoma de Barcelona, Bellaterra
www.uab.cat/cultura

23 de noviembre
BCN BIO PRO Encuentro científico
Para estudiantes y público general
www.bcnbiopro.cat

OCEANOGRAFÍA

La travesía del hierro desde el abismo

Se ha descubierto que el penacho de agua rica en hierro procedente de una chimenea hidrotermal se extiende más de 4000 kilómetros a lo largo del océano

KAZUHIRO MISUMI

En las aguas superficiales del océano, iluminadas por la luz solar, las algas planctónicas transforman el dióxido de carbono del agua marina en materia orgánica, la cual se deposita seguidamente en el fondo oceánico y secuestra así carbono de la atmósfera. En las regiones oceánicas que regulan la concentración atmosférica de CO_2, la disponibilidad de hierro (un oligoelemento) controla la producción primaria de las algas. Las fluctuaciones en la abundancia de hierro han modulado parcialmente la variabilidad climática durante las pasadas transiciones de períodos glaciares a interglaciares y se espera que afecten al clima futuro.

En un artículo de la revista *Nature*, Joseph A. Resing, de la Universidad de Washington, y sus colaboradores exponen que por unas fisuras de una dorsal oceánica abisal se libera una cantidad sustancial de hierro que las corrientes oceánicas profundas transportan lentamente a lo largo de miles de kilómetros. Mediante el uso de un modelo oceánico, los investigadores demuestran que el hierro procedente del sistema mundial de dorsales oceánicas alcanza la zona fótica (la región superficial iluminada por el sol) y podría contribuir al crecimiento de las algas.

A finales de los años setenta del siglo pasado, se descubrieron unas aguas calientes enriquecidas en minerales que brotaban a través de unas fracturas del fondo oceánico llamadas chimeneas hidrotermales. Los análisis químicos revelaron la abundancia de hierro en estas aguas en comparación con el agua oceánica circundante. Durante décadas se había considerado que el hierro hidrotermal constituía un aporte menor al balance de este elemento en el océano global, porque se suponía que, debido a su baja solubilidad en el agua, formaba un precipitado sólido en las proximidades de los puntos de emisión. Sin embargo, los estudios posteriores apuntaron a la posibilidad de que parte del hierro liberado por las chimeneas hidrotermales podía ser transportado y alejado de estas. Dicha idea se conoce como la «hipótesis de la chimenea con fugas».

De ese modo, se detectó una concentración inusualmente alta de hierro disuelto distribuido a lo largo de distancias horizontales de cientos y miles de kilómetros en una serie de cuencas oceánicas profundas. El origen hidrotermal del hierro se infirió a partir de la composición isotópica del helio en el agua. El helio presenta dos isótopos estables: ^{3}He y ^{4}He. El agua hidrotermal está enriquecida en ^{3}He en relación con la proporción hallada en la atmósfera (se dice que presenta un exceso de ^{3}He). Por consiguiente, la detección de un exceso de ^{3}He indicaba que el agua poseía un origen hidrotermal. Con anterioridad se habían hallado correlaciones entre el hierro disuelto anómalo y el exceso de ^{3}He, pero ambas series de datos se tomaron en momentos distintos, así que no pudo confirmarse el origen hidrotermal de las anomalías de hierro disuelto.

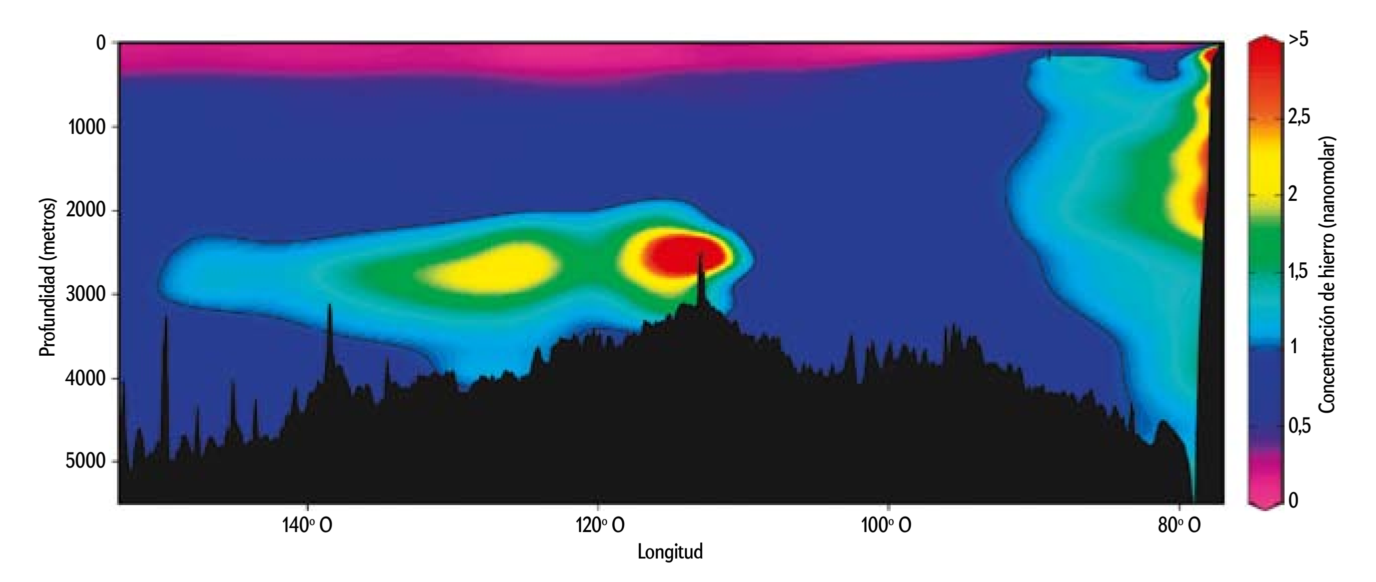


MUESTREO DE AGUA MARINA. Para analizar la concentración de hierro y otros parámetros se tomaron cientos de muestras de agua a distintas profundidades y a lo largo de un transecto longitudinal. En la imagen se observa la recuperación de una roseta equipada con botellas de muestreo.

Resing y sus colaboradores tomaron centenares de muestras de agua oceánica en la región meridional de la dorsal oceánica del Pacífico oriental, cuya actividad volcánica es particularmente intensa. Los investigadores identificaron un gran penacho de agua con elevadas concentraciones de hierro disuelto que se extendía a lo largo de 4000 kilómetros transportado por las corrientes. Los valores de hierro disuelto mostraban una correlación lineal con los valores de ^{3}He en exceso, unas medidas que se realizaron de modo simultáneo. Dicha correlación demuestra inequívocamente que la anomalía de hierro disuelto procede de las chimeneas hidrotermales de la dorsal del Pacífico oriental.

Por otra parte, los autores hallaron que la relación lineal entre el hierro disuelto y el exceso de ^{3}He se mantenía a lo largo del gran penacho. Ello indica que tanto la concentración de helio como la de hierro disuelto están reguladas por un mismo proceso, el cual correspondería a una dilución en el agua oceánica circundante, según los investigadores. Esa pauta conservadora no se ajusta al comportamiento químico que cabría esperar del hierro inorgánico y apoya un aspecto de la hipótesis de la chimenea con fugas, a saber, que la estabilización físicoquímica permite el transporte del hierro a largas distancias desde las chimeneas hidrotermales. Además, a partir de la relación lineal, los autores estimaron que la cantidad de hierro transportado globalmente desde las chimeneas alcanzaba entre 3 y 4 gigamoles, un valor más de cuatro veces superior al estimado antes.

El equipo de Resing utilizó entonces un avanzado modelo oceánico global para estimar en qué medida participa el hierro hidrotermal en la exportación de carbono orgánico de la zona fótica y halló que su contribución era considerable, especialmente en la región meridional del océano. El descubrimiento es relevante en cuanto a la función del hierro hidrotermal en climas pasados, actuales y futuros. Se cree así que, durante los períodos glaciares, un aumento en la caída de polvo con contenido en hierro sobre la superficie oceánica contribuyó a reducir la concentración de



EL AGUA ENRIQUECIDA EN HIERRO procedente de la chimenea hidrotermal de la dorsal oceánica del Pacífico oriental forma un penacho que se extiende a lo largo de 4000 kilómetros. En la imagen se observa la distribución del hierro disuelto a distintas profundidades y a lo largo de un transecto longitudinal en el océano.

CO_2 atmosférico. Sin embargo, un aporte estable de hierro hidrotermal a lo largo de escalas temporales de milenios habría amortiguado las variaciones a corto plazo de ese aporte de hierro y, en consecuencia, también de la absorción del CO_2 oceánico, lo que pone en duda dicha teoría.

Para llegar a esclarecer la función del hierro hidrotermal en los ciclos marinos biogeoquímicos debe despejarse un gran número de interrogantes. Uno de los problemas reside en que la magnitud del flujo global de hierro hidrotermal es sumamente incierta. Resing estimó ese valor a partir de datos procedentes de un solo sistema hidrotermal; pero probablemente la relación entre las concentraciones de hierro y ^{3}He varía en distintas chimeneas hidrotermales, ya que la historia tectónica y la composición química de las rocas circundantes son diferentes. Por ejemplo, la proporción de la concentración de hierro disuelto respecto a la de ^{3}He es 80 veces superior en el Atlántico sur que en el Pacífico sur. Por consiguiente, se requiere obtener un mayor número de datos en distintos puntos para acotar las estimaciones del flujo global de hierro hidrotermal y deben entenderse mejor los procesos que causan la variabilidad entre dichos puntos.

Otro problema guarda relación con el mecanismo por el que el hierro se estabiliza alrededor de las chimeneas hidrotermales. Una posibilidad es la formación de complejos entre iones de hierro y moléculas orgánicas que sirven de ligando. Se piensa que los ligandos orgánicos se distribuyen de forma ubicua en el océano y controlan las concentraciones de hierro disuelto al aumentar la solubilidad del elemento (más del 99 por ciento del hierro disuelto en el agua marina forma complejos organometálicos). Pero nuestro conocimiento sobre las fuentes y los sumideros de los ligandos orgánicos en el océano todavía es limitado, y la mayor parte de modelos oceánicos globales suponen una concentración fija de estos. El modelo global oceánico utilizado por Resing representa los mecanismos de la dinámica de los ligandos orgánicos en el océano. El equipo de investigación pudo, por tanto, simular el transporte de hierro de origen orgánico desde las chimeneas hidrotermales. Aunque el modelo parte de una serie de suposiciones, los resultados de los autores subrayan la relevancia de representar en los modelos los mecanismos de la dinámica de los ligandos.

¿Continuará siendo el hierro hidrotermal una fuente de nutrientes para las algas superficiales? En las últimas décadas se han producido una serie de cambios ambientales rápidos en el sur del océano: por un lado, el aumento de la concentración de gases de efecto invernadero y la disminución del ozono estratosférico han conllevado un incremento del flujo ascendente de agua profunda; por otro, una reciente amplificación del ciclo hidrológico y el deshielo de los glaciares antárticos han intensificado la estratificación del agua superficial. Tales alteraciones podrían modificar los intercambios entre las aguas superficiales y profundas y, por tanto, la contribución del hierro hidrotermal en la productividad biológica superficial.

—Kazuhiro Misumi
Laboratorio de Investigación de Ciencias Ambientales
Instituto Central de Investigación de Industria de Energía Eléctrica
Abiko, Japón

Artículo original publicado en *Nature*, vol. 523, págs. 160-161, 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015

PARA SABER MÁS

The distribution and stabilisation of dissolved Fe in deep-sea hydrothermal plumes. S. A. Bennett et al. en *Earth and Planetary Science Letters*, vol. 270, págs. 157-167, 2008.
Basin-scale transport of hydrothermal dissolved metals across the South Pacific Ocean. J. A. Resing et al. en *Nature*, vol. 523, págs. 200-203, 2015.
Modelling organic iron-binding ligands in a three-dimensional biogeochemical ocean model. C. Völker y A. Tagliabue en *Marine Chemistry*, vol. 173, págs. 67-77, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Fuentes termales en el fondo del océano. John M. Edmond y Karen Von Damm en *IyC*, junio de 1983.
El bosque invisible de los océanos. Paul G. Falkowski en *IyC*, octubre de 2002.

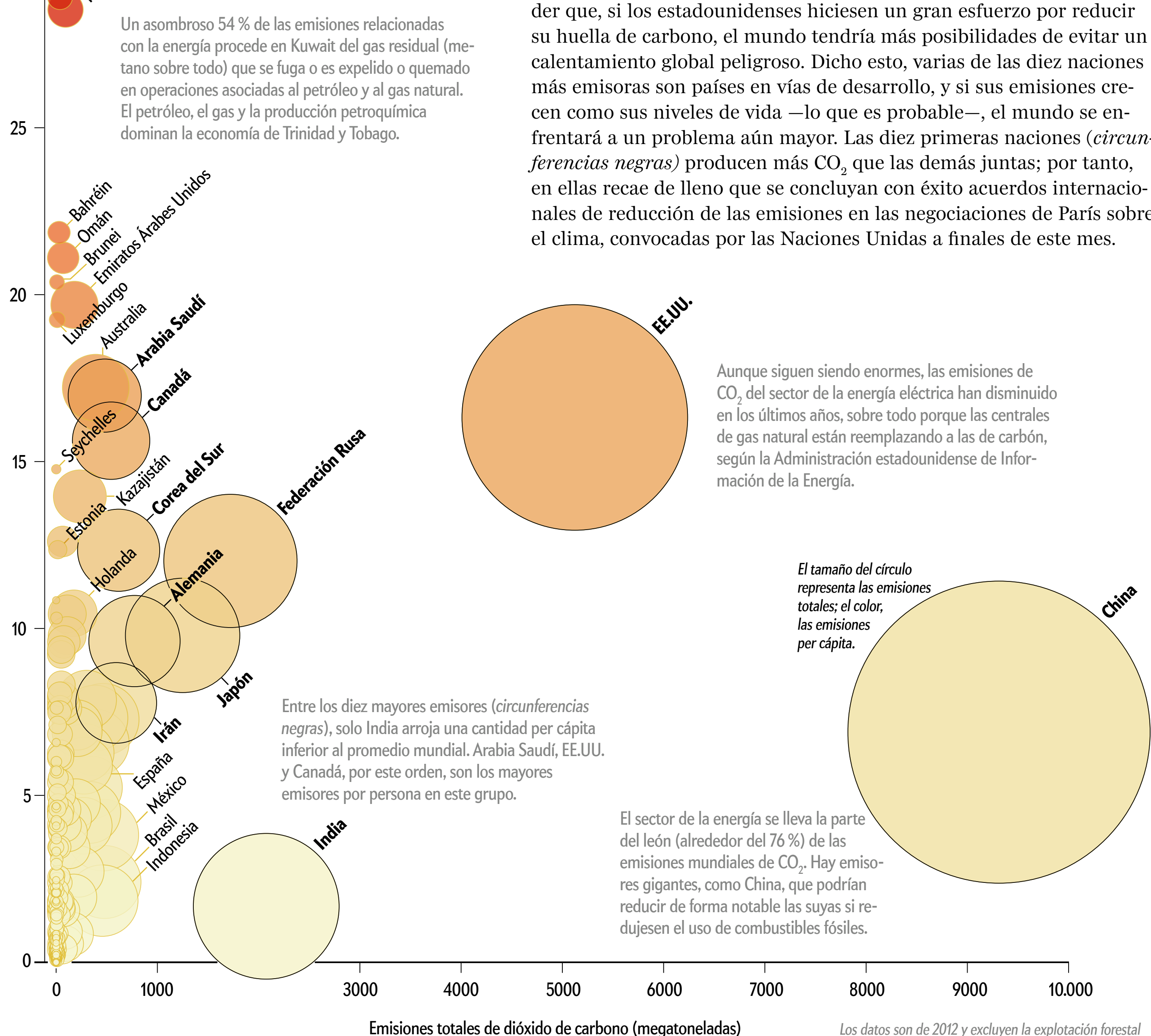
CALENTAMIENTO GLOBAL

Una sorpresa con los gases de invernadero

Per cápita, los mayores emisores de carbono del mundo son países pequeños

MARK FISCHETTI

China y Estados Unidos envían mucho más dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera que los demás países (*de derecha a izquierda, abajo*). Pero, por persona, las mayores cantidades en el mundo son las de Qatar, Trinidad y Tobago, y Kuwait (*de arriba abajo*), según los investigadores del Instituto de Recursos Mundiales. La razón principal es que la producción de petróleo y gas natural (grandes fuentes de gases de invernadero) domina esas economías nacionales. EE.UU., sin embargo, genera también unas emisiones per cápita altas, lo que da a entender que, si los estadounidenses hiciesen un gran esfuerzo por reducir su huella de carbono, el mundo tendría más posibilidades de evitar un calentamiento global peligroso. Dicho esto, varias de las diez naciones más emisoras son países en vías de desarrollo, y si sus emisiones crecen como sus niveles de vida —lo que es probable—, el mundo se enfrentará a un problema aún mayor. Las diez primeras naciones (*circunferencias negras)* producen más CO_2 que las demás juntas; por tanto, en ellas recae de lleno que se concluyan con éxito acuerdos internacionales de reducción de las emisiones en las negociaciones de París sobre el clima, convocadas por las Naciones Unidas a finales de este mes.



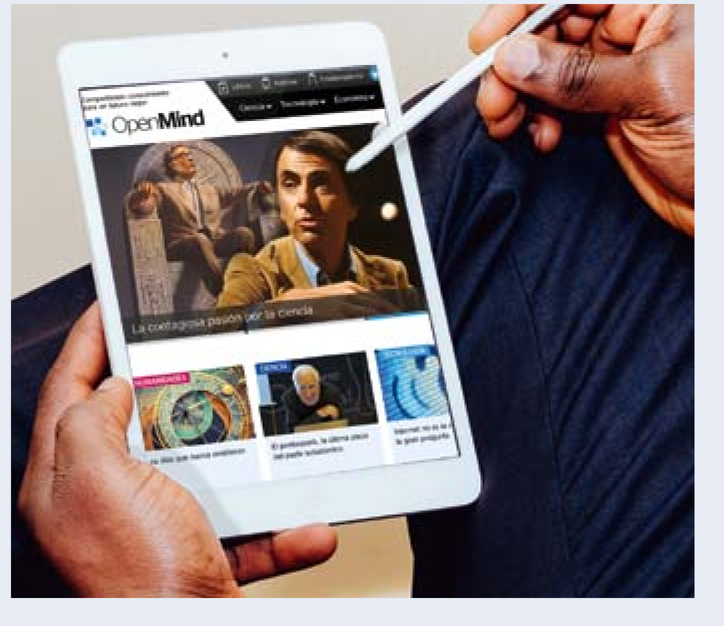
Los datos son de 2012 y excluyen la explotación forestal y los cambios en el uso de la tierra.

FUENTE: EXPLORADOR DE DATOS SOBRE EL CLIMA DE LA HERRAMIENTA CAIT, DEL INSTITUTO DE RECURSOS MUNDIALES, HTTP://CAIT2.WRI.ORG; JAN WILLEN TULP (*gráfico*)

BBVA OpenMind: compromiso con la divulgación

OpenMind (**www.bbvaopenmind.com**), la comunidad del conocimiento de BBVA, es un espacio de difusión y de intercambio de ideas cuyo principal objetivo es crear y compartir conocimiento para construir un futuro mejor.

La plataforma OpenMind nació en 2011 para facilitar el acceso abierto y universal a la serie de libros que, desde 2007, publica anualmente BBVA. En esta colección, expertos de todo el mundo analizan cuestiones claves de nuestro tiempo: las fronteras del conocimiento científico; la globalización y la innovación; los desafíos de la ética; las distintas visiones del futuro; o la irrupción de Internet en la era digital y en la empresa. Cada libro es una recopilación de ensayos firmados por grandes expertos internacionales como Jesús Ávila, Gerald Holton, Joan Massagué, José M. Mato, Ginés Morata o José Manuel Sánchez Ron. Son ya casi 200 los autores implicados en el proyecto y todos sus textos se pueden descargar gratuitamente en castellano y en inglés (este año los libros y los artículos se han descargado más de 50.000 veces).



En los últimos años OpenMind ha ido evolucionando hasta convertirse en un foro dinámico para el descubrimiento y la diseminación de ideas. Los libros, escritos en un tono divulgativo y con un lenguaje accesible para el público no especialista, se complementan con otro tipo de contenidos y formatos multimedia como artículos, entrevistas, vídeos e infografías que se actualizan cada semana.

Para acceder a una audiencia universal, OpenMind plantea un amplio abanico de temas, que van desde las ciencias más puras (el origen de la holografía o la promesa de las nanopartículas en la lucha contra el cáncer), hasta las variables más artísticas de las humanidades (por qué el placer de la música no es universal, o cómo era el arte en la Edad Media al margen de las imágenes religiosas). La empresa, los negocios y las nuevas tecnologías también tienen su sitio en OpenMind, además del análisis y el debate sobre las cuestiones medioambientales que están marcando nuestro tiempo.

Para dar cobertura a más de cuarenta temáticas, OpenMind cuenta con la ayuda de un magnífico equipo de más de 50 colaboradores, profesionales y académicos, comprometidos con la divulgación y que comparten sus reflexiones e ideas a través de esta plataforma.

En el ámbito académico, OpenMind busca el rigor y los últimos avances y tendencias, por lo que colabora con algunas de las instituciones internacionales más prestigiosas, como el Massachusetts Institute of Technology (MIT) y la Harvard Business School. Gracias a esta asociación, la comunidad tiene a día de hoy una creciente presencia fuera de España. Cerca del 80 % de las visitas que ha tenido en durante el último año proviene de fuera de nuestras fronteras, principalmente de México, Estados Unidos, Colombia, India o el Reino Unido, entre otras.

OpenMind: un firme compromiso con la ciencia

La ciencia ocupa un lugar preferente dentro de OpenMind, pues es uno de los motores fundamentales del cambio, y por ello es necesario que entidades privadas como BBVA la apoyen, le den impulso y la acerquen a la sociedad.

La comunicación de la ciencia es clave para desarrollar la labor de OpenMind con el mayor éxito posible. La web Materia es un claro referente nacional y en todo el mundo hispanohablante en cuanto a periodismo científico, por lo que OpenMind ha buscado su apoyo para crear un proyecto conjunto que explora las historias y los personajes más curiosos e interesantes del mundo de la ciencia (como Marie Curie, Edison o Tesla). Con el espacio "Ventana al Conocimiento" OpenMind y Materia pretenden despertar el interés del público general por la ciencia y descubrir su cara más cautivadora e interesante.

Esta colaboración se va a intensificar aún más con la celebración de un evento conjunto el próximo 25 de noviembre para conmemorar los 100 años de la Teoría de la Relatividad. Además, Materia y OpenMind preparan un especial de contenidos relacionados con la figura de Einstein y sus descubrimientos científicos.

La comunidad OpenMind también celebra otros encuentros periódicos, como la presentación anual de sus libros, en España y en el extranjero, y apoya y fomenta la actividad de otras organizaciones que trabajan en pro de la ciencia, como la Fundación para el Conocimiento madri+d (Dirección General de Universidades e Investigación de la Comunidad de Madrid) o el Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT).

A través de sus múltiples actividades, tanto en el mundo *online* como el *offline*, OpenMind trabaja para seguir ampliando sus colaboraciones con todas aquellas entidades y personas que compartan su misma filosofía: difundir el mejor conocimiento para construir, entre todos, un futuro mejor. ■



EVOLUCIÓN HUMANA

El ADN antiguo arroja luz sobre el debate de las lenguas indoeuropeas

Dos estudios de ADN antiguo en humanos revelan las expansiones de las poblaciones durante la Edad de Bronce y aportan nuevos datos al viejo debate sobre el origen y la difusión de las lenguas indoeuropeas

JOHN NOVEMBRE

El dicho arqueológico de que las ollas no son personas expresa el desafío que supone descifrar los movimientos de las poblaciones a través de los artefactos culturales. Para superar este obstáculo, arqueólogos y genetistas de poblaciones están uniendo fuerzas para extraer ADN de restos humanos hallados junto a pruebas arqueológicas de culturas del pasado.

En junio de este año, Wolfgang Haak, de la Universidad australiana de Adelaida, y Morten E. Allentoft, de la Universidad de Copenhague, publicaban en *Nature*, junto con numerosos colaboradores, dos de los estudios más extensos sobre ADN antiguo realizados hasta la fecha (en el primero han participado también Rafael Garrido Pena, de la Universidad Autónoma de Madrid; Michael Kunst, del Instituto Arqueológico Alemán de Madrid; Roberto Risch, de la Universidad Autónoma de Barcelona, y Manuel A. Rojo Guerra, de la Universidad de Valladolid). En conjunto, ambos trabajos han analizado un total de 170 muestras, y cada uno ha aportado datos que tienen una notable repercusión en la antigua controversia acerca de los orígenes de las lenguas indoeuropeas.

Esta amplia familia de lenguas se ha hablado en toda Europa y en el centro y sur de Asia desde el comienzo de la historia escrita. Incluye, entre otras, las lenguas itálicas, germánicas, eslavas, indo-arias y las tocarias. Durante largo tiempo, se ha debatido sobre cuándo y dónde se originó la precursora de estas lenguas y cómo se extendió. Se barajan dos hipótesis principales: la de Anatolia y la de la estepa.

La hipótesis de Anatolia postula que la propagación del proto-indoeuropeo se produjo junto con la expansión de la agricultura desde Anatolia (una región que se encuentra dentro de la actual Turquía) durante el Neolítico, aproximadamente en el año 7000 a.C. Algunos datos arqueológicos y genéticos apoyan esta hipótesis, así como el análisis filogenético de datos lingüísticos.

La hipótesis de la estepa, en cambio, señala la propagación del proto-indoeuropeo desde la estepa Póntica (una región ubicada en la actual Rusia, Ucrania y Kazajstán, que se encuentra al norte del mar Negro y se extiende hacia el este hasta el Caspio). Las versiones recientes de esta segunda hipótesis sostienen que la propagación del idioma se produjo a finales de la Edad del Cobre y de la Edad del Bronce antiguo, entre 3700 a.C. y 2000 a.C., por pastores nómadas capaces de cabalgar y dotados con la innovación de los vagones de ruedas (probablemente estos pueblos estén asociados con una cultura conocida por los arqueólogos como yamna o yamnaya).

Estudios anteriores de ADN moderno y antiguo habían sugerido una afluencia de pueblos en Europa desde Eurasia después de la propagación de la agricultura neolítica. Sin embargo, los detalles no estaban claros y el papel de las poblaciones de las estepas era un enigma. Para resolver esta incertidumbre, Haak y Allentoft, junto con sus colaboradores, han obtenido muestras de ADN antiguo de un amplio número de culturas arqueológicas procedentes de Europa central y Asia que datan de entre 6000 y 900 a.C. Aunque cada estudio ha utilizado diferentes estrategias (el grupo de Allentoft ha analizado genomas completos secuenciados, mientras que el de Haak ha seleccionado determinadas regiones), han obtenido resultados en 101 y 69 muestras, respectivamente, un logro destacable. La calidad de las secuencias es menor si se las compara con los datos obtenidos en el ADN actual, pero suficiente para trazar los rasgos generales de las migraciones humanas.

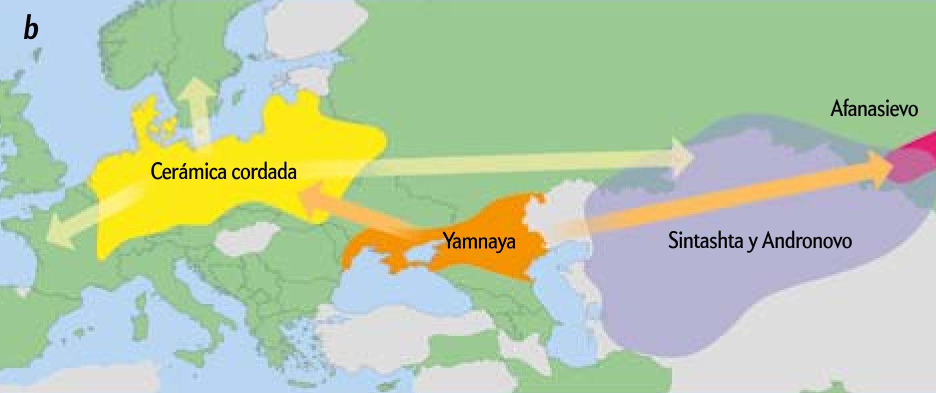
Ambos estudios han encontrado una afinidad genética entre muestras de la cultura centroeuropea de la cerámica cordada, que existió desde alrededor de 2500 a.C., y muestras de la anterior cultura yamnaya de las estepas. Esta similitud entre poblaciones distantes se explica mejor por una expansión notable hacia el centro de Europa de pueblos de cultura yamnaya o de parientes cercanos. Esta expansión es consistente con la hipótesis de la estepa, que argumenta que las culturas de la cerámica cordada eran el vehículo para la dispersión de las lenguas indoeuropeas en Europa.

Los resultados también ayudan a explicar las misteriosas ascendencias mezcladas que Nick Patterson, del Instituto Broad (de Harvard y el Instituto de Tecnología de Massachusetts), y su equipo hallaron en Europa y en América, y la que Maanasa Raghavan, de la Universidad de Copenhague, y sus colaboradores encontraron en un ADN antiguo de un niño que vivió hace 24.000 años en Siberia oriental. Tanto el equipo de Allentoft como el de Kaak sugieren que esta ascendencia habría entrado en Europa gracias a la expansión de pueblos relacionados con los yamnaya, que, a su vez, descienden de las poblaciones de Eurasia que contribuyeron al poblamiento de América.

Los datos también sugieren que los pueblos esteparios migraron hacia el este. Allentoft y sus colaboradores han descubierto que la cultura afanasievo de Asia central muestra afinidad genética con los yamnaya. También han encontrado pruebas que apoyan la teoría de una migración de retorno de poblaciones relacionadas con la cultura de la cerámica cordada, que contribuyeron a los orígenes de la cultura sintashta en los Urales y a sus descendientes, la cultura andronovo. Esta idea reviste un interés particular porque la hipótesis de la estepa supone que una migración hacia el este de las poblaciones descendientes de la estepa contribuyó al origen de las lenguas tocarias, una rama del indoeuropeo que se habló en el oeste de China.

En conjunto, ambos trabajos sostienen que los movimientos de población que se





¿DÓNDE SE ORIGINARON LAS LENGUAS INDOEUROPEAS? Las lenguas indoeuropeas se han hablado en una amplia zona de Eurasia a lo largo de toda la historia escrita (*a*) (los países en los que estas lenguas se hablan hoy en día aparecen en verde). Se han propuesto dos orígenes geográficos para estos idiomas: Anatolia y la estepa Póntica. Dos extensos estudios han analizado muestras de ADN antiguo obtenidas en toda Europa y en el centro de Asia (*b*). Sus datos apuntan a una migración humana desde la cultura yamnaya de la estepa. Concluyen que la cultura de la cerámica cordada de Europa central desciende de la cultura yamnaya. Uno de los trabajos también señala que la cultura afanasievo al este está relacionada con la yamnaya, y que las culturas sintashta y andronovo descienden de la cerámica cordada. Las flechas indican las migraciones; las que parten de la cultura de la cerámica cordada demuestran que los pueblos de esta cultura arqueológica (o sus parientes) fueron los responsables de la difusión de las lenguas indoeuropeas. (Todos los límites de colores son aproximados.)

produjeron durante la Edad del Bronce fueron importantes para la conformación de la genética de Eurasia. Por supuesto que, por sí solo, el ADN antiguo no puede demostrar la propagación de las lenguas —hacen falta más datos para refinar nuestra comprensión del fenómeno—, pero la expansión de pueblos relacionados con la cultura yamnaya añade peso a la hipótesis de la estepa. Si los genes se movían en masa, es probable que también se movieran las palabras.

Queda por ver si el ADN antiguo también apoyará la hipótesis de que la rama indo-iraní del indoeuropeo se remonta a una migración hacia el sur desde la estepa. La investigación sobre ADN actual ha planteado la existencia de un poblamiento antiguo de la India desde el norte: ¿podría estar relacionado directamente con los pueblos esteparios? Todavía no se ha podido determinar el tamaño de la población ancestral de las estepas y la velocidad a la que se dispersó. Por último, los modelos migratorios presentados difieren en términos de cuán cercana es la relación de las poblaciones de Oriente Próximo, como los armenios, con los pueblos de las estepas. Según el grupo de Haak, las poblaciones de Oriente Próximo contribuyeron a la cultura yamnaya, pero los resultados del grupo de Allentoft no son compatibles con tal mezcla. Futuros análisis deberán resolver estas cuestiones.

Con todo, los dos estudios comentados aquí representan un hito en un debate de 200 años de antigüedad. Desafortunadamente, esta discusión fue clave en la política racista y en la ciencia del siglo xix y principios del siglo xx en Europa. La investigación actual debe realizarse de una manera más abierta y humana. Será emocionante ver lo que el cuidadoso análisis de ADN antiguo revelará sobre la historia de otras familias lingüísticas y sus hablantes.

Estos dos estudios también dejan entrever de qué forma el ADN antiguo aportará datos a los estudios de evolución adaptativa. Allentoft y sus colaboradores han observado que la propagación de la mutación que permite a los humanos beber leche en la edad adulta comenzó en la Edad del Bronce, más tarde de lo que indicaban otros estudios. Otro artículo publicado este año en *bioRxiv*, en el que han participado Haak y buena parte de los mismos coautores del trabajo que hemos comentado, llega también a la misma conclusión

Por último, cabe señalar que los genomas de las personas que viven hoy en día varían más o menos continuamente con la geografía en la mayoría de las regiones del planeta. Pero estos dos estudios sugieren que los patrones relativamente continuos observados en el ADN actual pueden ser el resultado de una compleja historia de expansiones y mezclas de las poblaciones antiguas. Claramente, la interacción entre la investigación del ADN antiguo, con la arqueológica y la lingüística nos permitirá ahondar en el estudio de la prehistoria.

—John Novembre
departamento de genética humana de la Universidad de Chicago.

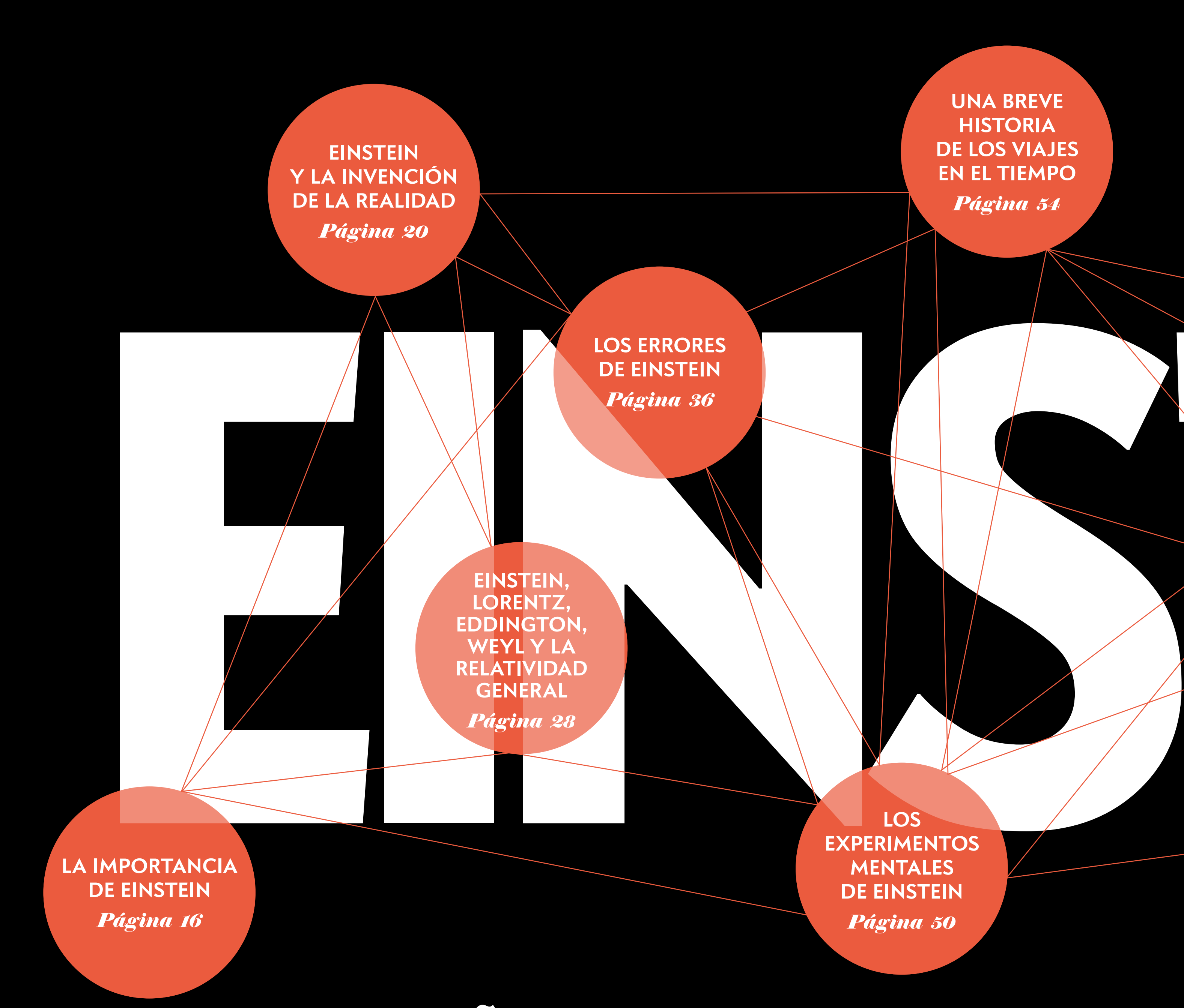
Artículo original publicado en *Nature*, vol. 522, págs. 164-165. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015.

PARA SABER MÁS

The horse, the wheel, and language: How Bronze-Age riders from the Eurasian steppes shaped the modern world. D. W. Anthony. Princeton University Press, 2007.
Population genomics of Bronze Age Eurasia. M. E. Allentoft et al. en *Nature*, vol. 522, págs. 167-172, 2015.
Massive migration from the steppe was a source for Indo-European languages in Europe. W. Haak et al. en *Nature*, vol. 522, págs. 207-211, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La lengua originaria de los europeos prehistóricos. Elisabeth Hamel, Theo Vannemann y Peter Forster en *IyC*, enero de 2003.
¿Cómo llegaron a Europa las lenguas indoeuropeas? Ruth Berger en *IyC*, enero de 2011.

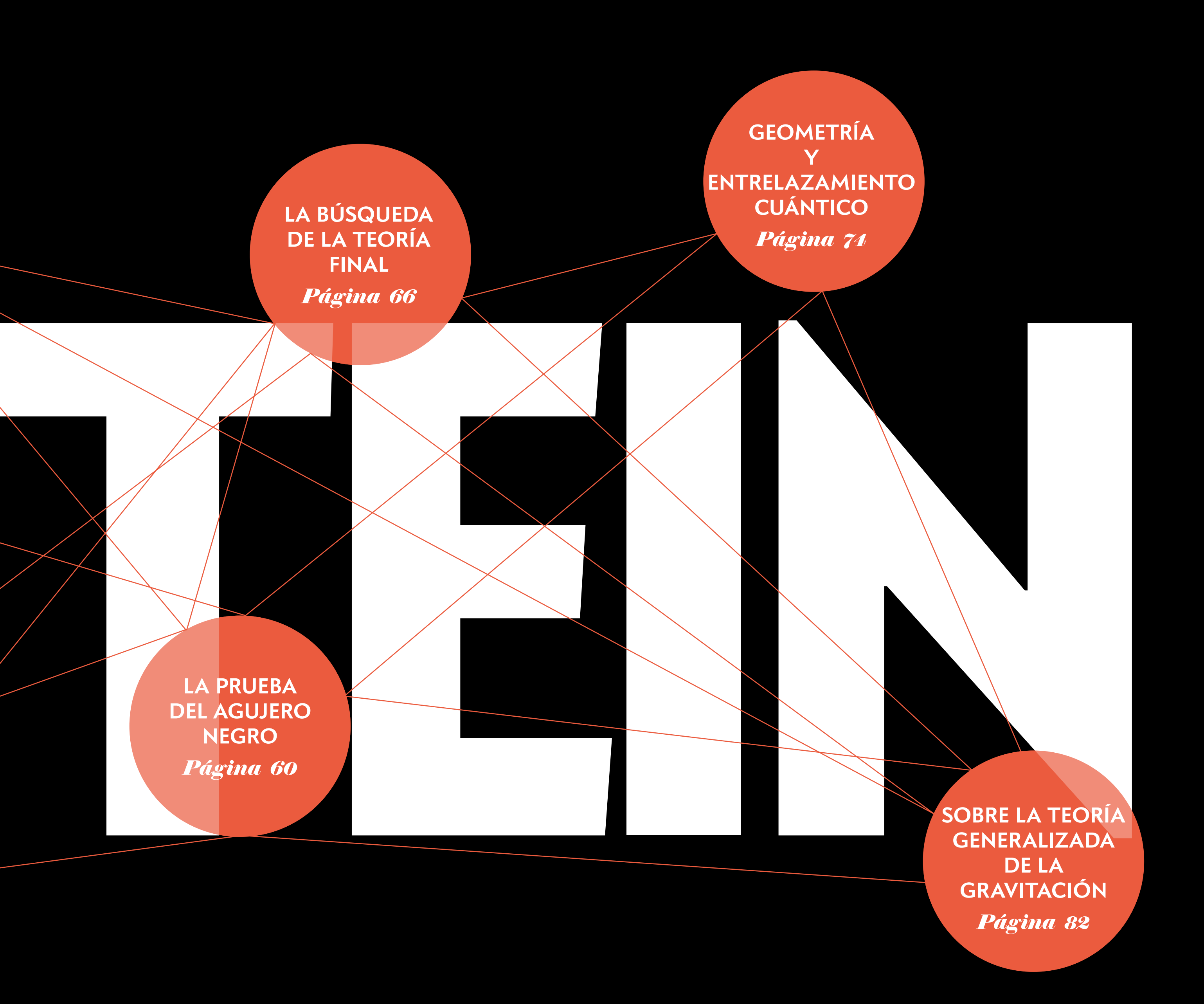


100 AÑOS DE RELATIVIDAD GENERAL

Todo el mundo sabe qué es la gravedad. Un bebé de tres meses mostrará sorpresa si una caja no se tumba como espera, y un niño de un año sabrá si un objeto en una posición inestable caerá o no según la forma que tenga. Primero los científicos pensaron que la gravedad era un tirón ejercido por la Tierra; más tarde, la concibieron de manera más general como una fuerza de atracción entre dos masas.

Entonces llegó Albert Einstein. En 1915, su teoría general de la relatividad puso de manifiesto que, más que una fuerza, la gravedad debía entenderse como una consecuencia de la curvatura del espacio. En otras palabras, todo lo que creíamos haber aprendido sobre la gravedad a partir de nuestra experiencia cotidiana resultó ser un error.

En un principio, la publicación de *Die Feldgleichungen der Gravitation* («Las ecuaciones de campo de la gravitación») el 2 de diciembre de 1915 no tuvo excesiva repercusión fuera del ámbito académico. Sin embargo, unos años después, las observaciones efectuadas du-



rante un eclipse solar por una expedición dirigida por Sir Arthur Eddington catapultaron la teoría a la fama. Tal y como Einstein había predicho, la luz de las estrellas se desviaba al pasar cerca del Sol. El *New York Times* lo anunció con un célebre titular: «Los hombres de ciencia, más o menos encandilados con los resultados de las observaciones del eclipse».

No faltaban razones para aquella excitación. Resulta difícil exagerar hasta qué punto la relatividad general cambió la imagen del mundo físico imperante hasta entonces. De un plumazo, el espacio y el tiempo dejaron de ser un mero telón de fondo para convertirse en verdaderos protagonistas dotados de una dinámica propia. Su curvatura dictaba los movimientos de los cuerpos celestes y nos mantenía con los pies pegados al suelo. Incluso la luz estaba obligada a moverse siguiendo su contorno.

La revolución relativista moldeó en buena medida el siglo xx. Influyó en la filosofía, el arte, la política y la cultura popular. Su creador se convirtió en el científico más famoso del mundo y su nombre se trocó en sinónimo de genio. Einstein se valió de su prominencia para influir en asuntos de importancia mundial. Abogó por la construcción de la bomba atómica, algo que luego lamentaría durante años. Presionó para que se protegiese al pueblo judío, criticó sin tapujos el racismo y fue activista en favor de los derechos civiles. La fama que rodeó a Einstein y a su gran idea supuso un cambio decisivo en la percepción pública de la ciencia. El siglo xx quedó convertido en la era científica por excelencia y dio paso a una transformación tecnológica que aún estamos viviendo.

El centenario de la relatividad general nos brinda una oportunidad para escrutar el increíble avance de la ciencia y su efecto en la sociedad. En las páginas que siguen recapitularemos cuánto hemos aprendido del logro de Einstein y aventuraremos los secretos que todavía nos depara su obra. Examinaremos de cerca el momento de inspiración que condujo al genio por el camino de la relatividad (*página 20*) y repasaremos cómo acogió la comunidad científica de la época su teoría de la gravedad (*página 28*). Exploraremos la evolución de sus ideas a través de sus errores (*página 36*) y homenajearemos su capacidad para llegar a la verdad por medio del pensamiento puro (*página 50*).

La trascendencia de la relatividad general puede también calibrarse a partir de un fracaso: cien años de mentes brillantes no han bastado para formular una teoría que unifique la gravedad con el resto de las interacciones fundamentales de la naturaleza. Einstein dedicó los últimos años de su vida a perseguir este sueño, que llegó a creer al alcance de la mano. Su motivación y su manera de afrontar el problema quedaron plasmadas en un artículo divulgativo que él mismo escribió en 1950 para *Scientific American*. A modo de homenaje, este número recupera también esta pieza histórica (*página 82*).

Hoy los físicos aún intentan materializar dicho sueño. Para ello, sondean algunos de los misterios que han aparecido tras su muerte, como la energía oscura, y exploran caminos que les permitan conjugar la gravedad y la mecánica cuántica (*página 66*). Al respecto, una línea de investigación reciente sugiere que la continuidad del espaciotiempo einsteiniano podría deberse al entrelazamiento cuántico, la misma propiedad que —ironías del destino— el físico alemán tachó de «espeluznante» (*página 74*).

Otros investigadores se han propuesto examinar la relatividad general indagando sus límites. Desde el punto de vista observacional, una red de radiotelescopios intentará comprobar si las predicciones de la teoría siguen aplicándose en el entorno extremo del agujero negro supermasivo de la Vía Láctea (*página 60*). Y, desde una perspectiva matemática, hace años que los expertos analizan una de las propiedades más sorprendentes de la relatividad general: que no prohíba los viajes al pasado (*página 54*).

Pocas teorías han influido tanto en la física del siglo XX como la de Einstein, y pocos legados científicos siguen hoy tan vivos como el suyo. Cien años después, la física espera su próxima relatividad general. Podría valernos otro Einstein.

HISTORIA DE LA CIENCIA

LA IMPORTANCIA DE EINSTEIN

Los frutos de una sola mente han moldeado la civilización más de lo que parece posible

Brian Greene

Albert Einstein dijo una vez que solo dos cosas podían ser infinitas: el universo y la estupidez humana. Y —añadió— en lo referente al universo no estaba seguro.

Al oír esto solemos reír entre dientes, o al menos sonreír. No nos ofende. Ello se debe a que el nombre de Einstein evoca la imagen de un sabio de otra época, entrañable y cálido. Vemos al genio científico bondadoso, de pelo enloquecido, cuyos icónicos retratos (montando en bicicleta, sacando la lengua o mirándonos con ojos penetrantes) se encuentran vivamente grabados en nuestra memoria cultural colectiva. Einstein se ha convertido en el símbolo de la pureza y el poder de la exploración científica.

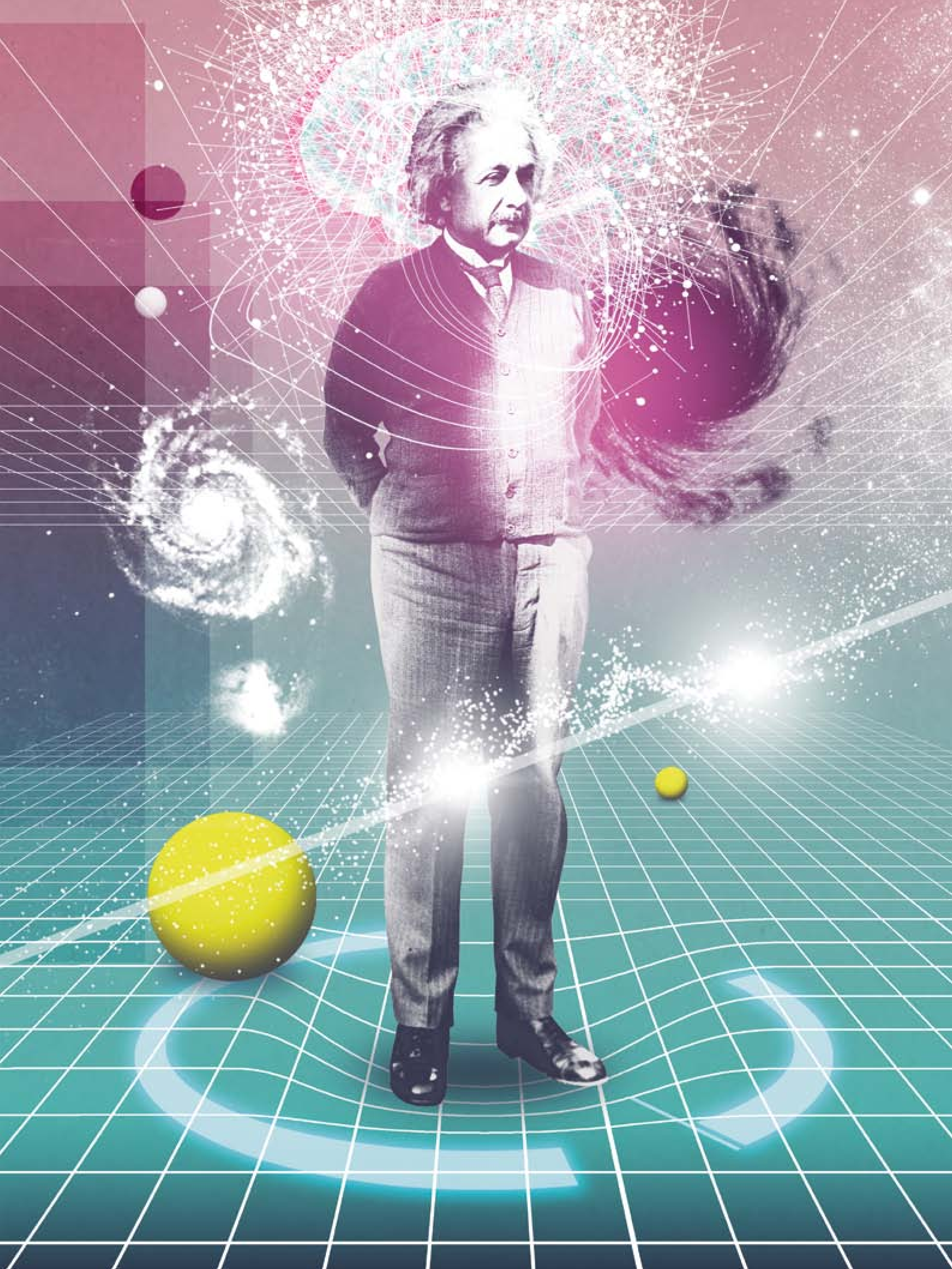
Para la comunidad científica, Einstein saltó a la fama en 1905, su *annus mirabilis*. En Berna, en los ratos libres que le dejaba su trabajo de ocho horas al día y seis días a la semana en la oficina de patentes suiza, escribió cuatro artículos que cambiarían el rumbo de la física. En marzo de ese año argumentó que la luz, descrita hasta entonces como una onda, se componía en realidad de partículas (hoy llamadas fotones), una idea que supuso el pistoletazo de salida para la mecánica cuántica. Dos meses después sus cálculos ofrecieron predicciones comprobables de la hipótesis atómica; estas se vieron confirmadas experimentalmente más tarde, lo que corroboró la idea de que la materia se componía de átomos. En junio completó la teoría especial de la relatividad, la cual implicaba que el espacio y el

EN SÍNTESIS

Los primeros éxitos científicos de Einstein tuvieron lugar en 1905. Ese año publicó cuatro artículos fundamentales; entre ellos, los que completaron la teoría especial de la relatividad.

Diez años después Einstein amplió dicha teoría para incluir la gravedad. Aquel hito superó la física de Newton y redefinió para siempre la noción de espacio y tiempo.

La teoría de Einstein daría lugar a nuevas líneas de investigación, muchas de las cuales siguen vivas aún hoy. Sus ideas permearon la cultura y moldearon el mundo de manera imborrable.



tiempo se comportaban como nunca nadie había imaginado; en esencia, que las distancias, velocidades y duraciones dependían del observador. Y, en septiembre, derivó una consecuencia de la relatividad especial que acabaría por convertirse en la ecuación más famosa del mundo: $E = mc^2$.

La ciencia suele progresar poco a poco. Las contribuciones que alertan de que se avecina una convulsión radical no se suceden con frecuencia. Pero, en esa ocasión, un solo hombre hizo que los timbres sonasen cuatro veces en un solo año; un asombroso aluvión de intuición creativa. Casi de inmediato, los círculos científicos dominantes entendieron que aquellos trabajos estaban agitando los fundamentos de la realidad. Pero, para el público general, Einstein no era todavía Einstein.

Eso cambió el 6 de noviembre de 1919.

La relatividad especial había establecido que nada podía viajar más rápido que la luz. El enfrentamiento con la teoría de la gravedad de Newton estaba servido, ya que en ella la atracción gravitatoria ejercía su influencia a través del espacio de manera instantánea. Motivado por esa amenazante contradicción, Einstein procedió sin miramientos a reescribir las reglas centenarias de la gravedad newtoniana, una tarea abrumadora que incluso sus más fervientes defensores consideraron quijotesca. Max Planck, el decano de la ciencia alemana, clamó: «Como viejo amigo suyo, debo aconsejarle en contra. [...] No lo logrará. Y, aunque lo lograse, nadie le creería». Como alguien que nunca cede ante la autoridad, Einstein obvió la advertencia. Y siguió haciéndolo durante casi una década.

Por fin, en 1915 anunció la teoría general de la relatividad. Esta reformulaba la gravedad basándose en una nueva y asombrosa noción: que el espacio y el tiempo se deforman y se curvan. No es que la Tierra aprese la taza que resbala de nuestra mano y tire de ella hasta llevarla a un prematuro fin en el suelo. Antes bien, el planeta comba el entorno circundante y hace que la taza se deslice a lo largo de una rampa espaciotemporal que la dirige hacia el suelo. La gravedad, proclamó Einstein, se encuentra tallada en la geometría del universo.

En los cien años que han pasado desde entonces, físicos e historiadores han ido componiendo pieza a pieza un relato coherente pero complejo de su génesis [*véase* «Einstein y la invención de la realidad», *en este mismo número*]. En alguno de mis escritos para el gran público he tenido el placer de trazar el ascenso de Einstein, desde unas elegantes maniobras y unos pasos en falso hasta la cima final. Lejos de desmitificar sus saltos creativos, examinar con detenimiento aquel proceso solo añade más brillo a la extraordinaria novedad y abrumadora belleza de su propuesta.

El 6 de noviembre de 1919, cuatro años después de completar la relatividad general, numerosos periódicos de todo el mundo anunciaron con entusiasmo las recién publicadas mediciones astronómicas que establecían que las posiciones de las estrellas eran ligeramente diferentes de lo que predecían las leyes de Newton. Los resultados confirmaron triunfalmente la teoría de Einstein y, de la noche a la mañana, lo convirtieron en un icono: el hombre que derrocó a Newton y que, en el camino, situó a la humanidad un paso de gigante más cerca de las verdades eternas de la naturaleza [*véase* «Einstein, Lorentz, Eddington, Weyl y la relatividad general», *en este mismo número*].

Pero, además, Einstein era perfecto para la prensa. Aunque bizquease ante los focos y de labios afuera expresara un ardiente deseo de soledad, sabía cómo atraer el interés del mundo hacia sus misteriosos pero trascendentales dominios. Soltaba frases ingeniosas («Soy un pacifista militante») y gozaba interpretando el papel del genio de genios desconcertado. En el estreno de *Luces de la ciudad*, mientras las cámaras disparaban sobre la alfombra roja, Charlie Chaplin le susurró a Einstein algo así como: «La gente me aclama porque todos me entienden, y a usted, porque no le entiende nadie». A Einstein le sentaba bien aquel papel. Y el público, harto de la Primera Guerra Mundial, le recibió con los brazos abiertos.

Brian Greene es catedrático de física y matemáticas de la Universidad de Columbia. Sus investigaciones se centran en la teoría de cuerdas. Ha escrito numerosos libros y es cofundador y presidente del consejo directivo del World Science Festival de Nueva York.



Mientras Einstein planeaba sobre la sociedad, sus ideas sobre la relatividad, al menos en su versión más ampliamente divulgada, parecían concordar con otras convulsiones culturales. Si James Joyce y T. S. Eliot astillaban la frase, Pablo Picasso y Marcel Duchamp escindían el lienzo, y Arnold Schoenberg e Igor Stravinski hacían añicos la escala, Einstein rompió las amarras que hasta entonces habían atado el espacio y el tiempo a los modelos obsoletos de la realidad.

Algunos han ido más lejos y han presentado a Einstein como la inspiración central del movimiento vanguardista del siglo xx, el manantial científico que obligó a repensar la cultura. Aunque resulta romántico creer que las verdades de la naturaleza generaron una ola que barrió los polvorientos vestigios de una cultura atrincherada, nunca he encontrado pruebas convincentes que unan esas convulsiones a la ciencia de Einstein. Una interpretación errónea pero muy extendida de la relatividad —que elimina toda verdad objetiva— ha sido la responsable de que, numerosas veces, el ámbito de la cultura haya evocado de manera injustificada las teorías del físico alemán. Curiosamente, los gustos del propio Einstein eran poco originales: prefería a Bach y a Mozart antes que a los compositores modernos y renunció al regalo de un mobiliario de la Bauhaus porque le agradaba más el clásico y manido que ya poseía.

Con todo, es justo decir que a principios del siglo xx no faltaron las ideas revolucionarias, muchas de las cuales sin duda se entremezclaron. Y que, por supuesto, Einstein fue un gran ejemplo de cómo el abandono de las premisas tradicionales permite descubrir paisajes nuevos y arrebatadores.

Un siglo después, los paisajes revelados por Einstein siguen siendo sorprendentemente vibrantes y fértiles. De la relatividad general nació en los años veinte la cosmología moderna, el estudio del origen y la evolución del universo como un todo. Sin que mediara relación entre ellos, el matemático ruso Aleksandr Friedmann y el físico y sacerdote belga Georges Lemaître se valieron de las ecuaciones de Einstein para deducir la expansión del universo. En un principio Einstein se resistió a aceptarla, e incluso modificó sus ecuaciones a fin de que diesen cabida a un universo estático, para lo cual introdujo la vituperada constante cosmológica. Sin embargo, las observaciones posteriores de Edwin Hubble demostraron que las galaxias se alejaban unas de otras, tras lo cual Einstein recuperó sus ecuaciones originales y aceptó que el universo se hinchaba. Sin embargo, que el cosmos se expandiese significaba que en el pasado tuvo que ser cada vez menor, lo que implicaba que tuvo que partir de una mota

LA FAMOSA ECUACIÓN DE EINSTEIN, $E = mc^2$**, escrita de su puño y letra en un artículo de 1946.**

ARCHIVOS ALBERT EINSTEIN, UNIVERSIDAD HEBREA DE JERUSALÉN

primordial, un «átomo primigenio», como lo llamó Lemaître. Así nació la teoría de la gran explosión.

En los años que han pasado desde entonces, la teoría de la gran explosión se ha desarrollado de manera sustancial (hoy la versión más aceptada incorpora la hipótesis de la inflación cósmica) y, gracias a diversas mejoras, ha superado todo un abanico de pruebas observacionales. Una de ellas, que en 2011 sería reconocida con el premio Nobel de física, mostró que en los últimos 7000 millones de años el universo no solo se ha estado expandiendo, sino que lo ha hecho de forma acelerada. ¿La mejor explicación? Una gran explosión ampliada con una versión de la constante cosmológica que Einstein acabó desechando. ¿La lección? Tras esperar lo suficiente, incluso algunas de sus ideas que se juzgaron equivocadas acabarían resultando correctas [*véase* «Los errores de Einstein», *en este mismo número*].

Otra de las grandes consecuencias de la relatividad general había sido derivada aún antes, en un análisis efectuado por el astrónomo alemán Karl Schwarzschild en el frente ruso durante la Primera Guerra Mundial. En los momentos en que no estaba calculando trayectorias balísticas para la artillería, Schwarzschild dedujo la primera solución exacta de las ecuaciones de Einstein. Esta describía la manera en que un cuerpo esférico, como el Sol, deformaba el espaciotiempo circundante. Como producto secundario, aquel resultado reveló algo peculiar: si un objeto cualquiera se comprime lo suficiente (en el caso del Sol, haría falta convertirlo en una esfera de unos tres kilómetros de radio), el espaciotiempo en sus inmediaciones se deformará hasta tal punto que cualquier cosa que se aproxime demasiado, incluso la luz, quedará atrapada. En lenguaje moderno, la solución de Schwarzschild mostró la posibilidad de que existiesen los agujeros negros.

En su momento la idea se consideró descabellada, una rareza matemática que muchos vaticinaron irrelevante para describir la realidad física. Pero son las observaciones, y no las expectativas, las que dictan qué es cierto y qué no. Hoy los datos astronómicos han establecido que los agujeros negros existen y abundan en el universo. Se encuentran demasiado lejos para que, al menos por ahora, podamos estudiarlos por medios directos, pero como laboratorios teóricos resultan indispensables. Desde que Stephen Hawking efectuase sus influyentes cálculos en los años setenta, los físicos se han ido convenciendo cada vez más de que la naturaleza extrema de los agujeros negros hace de ellos un campo de pruebas idóneo para ir más allá de la relatividad general y, en particular, para fusionarla con la mecánica cuántica [*véanse* «Geometría y entrelazamiento cuántico», por Juan Maldacena *y* «La prueba del agujero negro», por Dimitrios Psaltis y Sheperd S. Doeleman, *en este mismo número*]. De hecho, uno de los debates más vivos de la física teórica actual versa sobre cómo deberíamos interpretar la frontera de un agujero negro (el horizonte de sucesos) y su interior a la luz de la mecánica cuántica [*véase* «Agujeros negros y muros de fuego», por Joseph Polchinski; Investigación y Ciencia, abril de 2015].

Todo lo anterior demuestra que las razones para celebrar cien años de relatividad general van mucho más allá del interés histórico. La teoría de Einstein se encuentra estrechamente entretejida con las investigaciones más innovadoras de la física actual.

¿Cómo lo hizo Einstein? ¿Cómo logró tantas aportaciones de una importancia tan duradera? Aunque cabe descartar que el físico alemán fuese el inspirador del cubismo o de la música atonal, Einstein es la razón por la que hoy somos capaces de imaginar que alguien, en la privacidad de su mente y mediante un gran esfuerzo del pensamiento, pueda descubrir verdades cósmicas. Como científico Einstein fue sociable, pero sus grandes logros llegaron en solitarios momentos de inspiración. ¿Se debieron esas intuiciones a que su cerebro gozaba de una arquitectura poco común? ¿A una perspectiva inconformista? ¿A una tenaz e intransigente capacidad de centrarse en un problema? Quizá. Sí. Probablemente. Por supuesto, no lo sabemos. Podemos especular tanto como queramos sobre cómo alguien pudo llegar a tal o cual idea, pero lo cierto es que la intuición y el pensamiento están moldeados por influencias demasiado numerosas para poder analizarlas.

Si prescindimos de las hipérboles, lo mejor que podemos decir es que Einstein tenía la mente adecuada y vivió en el momento idóneo para abordar una serie de problemas físicos de gran profundidad. Sus numerosas pero relativamente modestas contribuciones en las décadas que siguieron al descubrimiento de la relatividad general dan a entender que, después, la oportunidad de ese particular nexo intelectual que puso al servicio de la física había pasado.

A la vista de todos sus logros y de su incesante legado, nos sentimos impelidos a considerar otra pregunta especulativa: ¿habrá algún día otro Einstein? Si nos referimos a otro supergenio que haga avanzar la ciencia a pasos agigantados, la respuesta es con toda seguridad afirmativa. En el medio siglo posterior a su muerte ha habido, sin duda, científicos de esa naturaleza. Pero si nos referimos a un supergenio admirado no por sus logros en el deporte o en el espectáculo, sino como apasionante ejemplo de lo que puede lograr la mente humana, entonces la pregunta habremos de hacérnosla a nosotros mismos. La respuesta dependerá de qué atributos juzgue nuestra civilización como más queridos.

PARA SABER MÁS

$E = mc^2$: A biography of the world's most famous equation. David Bodanis. Penguin, 2000.

The fabric of the cosmos: Space, time and the texture of reality. Brian Greene. Knopf, 2004.

The collected papers of Albert Einstein. Princeton University Press. **http://einsteinpapers.press.princeton.edu**

EN NUESTRO ARCHIVO

Teoría de cuerdas: Reflexiones informales sobre su futuro. Brian Greene en *IyC*, enero de 2004.

HISTORIA DE LA CIENCIA

EINSTEIN Y LA INVENCIÓN DE LA REALIDAD

Albert Einstein creó su teoría más célebre inmerso en conflictos personales, tensiones políticas y una rivalidad científica que casi le cuesta la gloria del descubrimiento

Walter Isaacson

La teoría de la relatividad general nació de una intuición. En 1907, dos años después del «año milagroso» en que creó la teoría de la relatividad especial y la de los cuantos de luz, Albert Einstein seguía siendo un técnico de la oficina de patentes suiza. El mundo de la física no había percibido su genio. En su oficina de Berna, una idea le «sobresaltó»: «Si una persona cae libremente, no sentirá su propio peso», recordaría. Más adelante la describiría como «la idea más feliz» de su vida.

La historia del hombre en caída libre se ha hecho célebre. Algunas versiones hablan de un pintor que realmente cayó del tejado de un edificio próximo a su oficina de patentes. Como pasa con otras historias famosas de descubrimientos relativos a la gravedad (Galileo dejando caer objetos desde la torre inclinada de Pisa o Isaac Newton contemplando la caída de una manzana), el relato popular las adorna. Pero aunque Einstein se fijara más en la ciencia que en lo «meramente personal», es poco probable que ni siquiera él viera caer a alguien y pensara en la teoría de la gravitación, y más improbable aún que lo considerara la ocurrencia más feliz de su vida.

GETTY IMAGES



Walter Isaacson es el presidente ejecutivo del Instituto Aspen. Ha sido presidente de la CNN y editor de la revista *Time*. Es autor de numerosos libros.



Einstein perfeccionó pronto ese experimento mental situando a su protagonista en una caja cerrada, la cabina de un ascensor, digamos, en caída libre. Se siente ingrávido. Los objetos que suelta flotan a su alrededor. De ninguna forma puede saber —no puede hacer ningún experimento para determinarlo— si la cabina cae aceleradamente en un campo gravitatorio o flota en una región del espacio exterior libre de gravedad.

Einstein imaginaba entonces que el hombre se encontraba en la misma cabina pero bien lejos en el espacio, en una región donde la gravedad no era perceptible, y que una fuerza constante tiraba de la cabina hacia arriba, causando una aceleración. El hombre sentiría que sus pies presionaban el suelo. Si soltase un objeto, caería al suelo con aceleración constante, como pasaría en la Tierra. No habría forma de distinguir los efectos de la gravitación de los de la aceleración [*véase* «Los experimentos mentales de Einstein», *en este mismo número*].

Este es el «principio de equivalencia» de Einstein. Los efectos locales de la gravedad y la aceleración son equivalentes. Por consiguiente, tienen que ser manifestaciones del mismo fenómeno, un campo cósmico que explica tanto la aceleración como la gravedad.

Einstein precisó ocho años para convertir este experimento mental en la más bella teoría de la historia de la física. Entretanto, acabaría pasando de una vida tranquila de padre casado y empleado de la oficina de patentes a la de profesor en Berlín, donde viviría solo, separado de su familia y cada vez más alejado, como consecuencia del auge del antisemitismo, de los que allí eran sus colegas de la Academia Prusiana de Ciencias. Gracias a que el Instituto de Tecnología de California y la Universidad de Princeton decidieron el año pasado ofrecer en Internet de modo gratuito los escritos y las cartas de Einstein, podemos hacernos una idea de cómo iba alternando las preocupaciones cósmicas y las personales. Disfrutamos con la excitación que sentía a finales de 1907 al escribir a toda prisa lo que llamó «una nueva forma, basada en la teoría de la relatividad, de considerar la aceleración y la gravedad». Luego percibimos su irritado aburrimiento al rechazar una semana después la solicitud de patente de una compañía eléctrica para una máquina de corriente alterna, una solicitud «incorrecta, imprecisa y poco clara». Los años siguientes fueron dramáticos en lo personal: mientras competía con un rival por ser el primero en formular la relatividad general, discutía con su mujer, de la que estaba separado, por dinero y por el derecho a ver a sus hijos. Aun así, en 1915 su obra culminaba con una teoría que iba a cambiar para siempre nuestra manera de entender el universo.

Einstein trabajaba a contrarreloj porque percibía que Hilbert se estaba acercando a las ecuaciones correctas

LA CURVATURA DE LA LUZ

En los cuatro años siguientes a que enunciase que la gravedad era equivalente a la aceleración, poco hizo con esta idea. Se centró en la teoría cuántica. Pero en 1911 puso su empeño de nuevo, una vez que por fin había conseguido entrar en el mundo académico y había sido nombrado profesor de la Universidad Alemana Charles-Ferdinand de Praga, en formular una teoría de la gravedad que generalizara la teoría de la relatividad especial, la relación entre espacio y tiempo que había establecido en 1905.

Al desarrollar el principio de equivalencia, descubrió que tenía unas ramificaciones sorprendentes. El experimento mental de la cabina llevaba a pensar que la gravedad curva la luz. Imaginemos que la cabina se acelera hacia arriba. Un rayo de luz entra en ella por un orificio en la pared. Cuando alcanza la pared opuesta está más cerca del suelo, porque la cabina se ha desplazado hacia arriba. Si pudiéramos dibujar la trayectoria del rayo a través de la cabina, veríamos que está curvada debido a la aceleración. Según el principio de equivalencia, el efecto tendría que ser el mismo si la cabina estuviera en reposo en un campo gravitatorio. En otras palabras, la luz tenía que curvarse si atravesaba un campo gravitatorio.

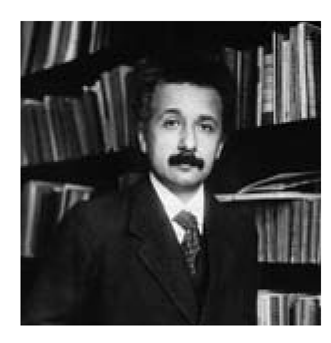
En 1912 Einstein pidió ayuda a un antiguo compañero de estudios universitarios para que le ayudase con las complicadas matemáticas de un espaciotiempo tetradimensional curvo y deformado. Hasta entonces sus triunfos se habían basado en su olfato para desvelar los principios físicos fundamentales de la naturaleza, pero había dejado a otros la tarea de encontrar su mejor expresión matemática. Ahora se daba cuenta de que las matemáticas no solo servían para describir las leyes naturales, sino también para descubrirlas.

EN SÍNTESIS

Percatarse de la equivalencia entre gravedad y aceleración condujo a Einstein, tras ocho años de trabajo, a generalizar su teoría de la relatividad especial.

Trabajó a toda velocidad para descubrir las fórmulas correctas de su teoría ante el temor de que un rival, el matemático David Hilbert, pudiera hacerlo antes. Al mismo tiempo, Einstein tenía grandes problemas familiares. Se estaba divorciando de su primera esposa y se encontraba separado de sus hijos; mientras, cortejaba a una prima con la que acabaría casándose.

Pese a todos los obstáculos que halló en el camino, Einstein consiguió completar la teoría de la relatividad general, una obra científica suprema.



El camino a la relatividad

Einstein hizo frente a dificultades personales y científicas mientras creaba la relatividad general

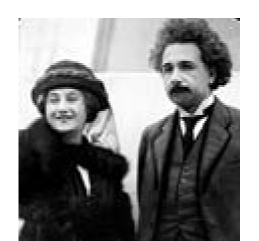


1907
Einstein comprende que una persona en caída libre no siente su propio peso. Esta intuición le encamina hacia la relatividad general.



1914
Einstein y su primera mujer, Mileva Marić, se separan. Marić se traslada de Berlín, donde estaban viviendo, a Zúrich con los dos hijos de la pareja.

1911
Como profesor de la Universidad Alemana Charles-Ferdinand de Praga, empieza a extender su teoría de la relatividad especial para que incluya la gravedad.



1912
El físico entabla una relación con su prima, Elsa Löwenthal, con quien acabará casándose.

GETTY IMAGES

El objetivo de Einstein con la teoría de la relatividad general era formular las ecuaciones que describen dos procesos relacionados entre sí: la acción del campo gravitatorio sobre la materia, cuyo movimiento determina, y la generación por la materia de campos gravitacionales en el espaciotiempo, lo que determina la curvatura de este.

Einstein se debatió durante tres años con distintos borradores y planteamientos generales. Hasta que en el verano de 1915 las matemáticas y la física empezaron a confluir.

UNA CRISIS EN SU VIDA ÍNTIMA

Para entonces se había trasladado a Berlín, donde le habían nombrado profesor y miembro de la Academia Prusiana de Ciencias. Pero no encontró demasiado apoyo para su trabajo. El antisemitismo crecía y no creó una camarilla de colegas a su alrededor. Acababa de separarse de su mujer, Mileva Marić, cuya formación como física le había permitido seguir la formulación de la relatividad especial en 1905, y que había regresado a Zúrich con los dos hijos de la pareja, de 10 y 4 años. Einstein mantenía una relación con su prima Elsa, con la que acabaría casándose, pero vivía solo en un apartamento con pocos muebles en el centro de Berlín. Comía intermitentemente, dormía de manera irregular, tocaba el violín y proseguía su lucha solitaria.

En 1915 su vida íntima se descomponía. Algunos de sus amigos le presionaban para que se divorciara y se casara con Elsa; otros, en cambio, le advertían de que no se dejara ver con ella ni le permitiera que se acercase a sus hijos. Marić escribía una y otra vez pidiendo dinero. Llegado un momento, Einstein respondió con desatada acritud: «De semejante exigencia no cabe ni hablar», le escribía. «Tus reiterados intentos por hacerte con todo lo que poseo son absolutamente vergonzosos.» Se esforzó por mantener correspondencia con sus hijos, pero sus cartas raramente eran contestadas y acusó a Marić de no entregárselas.

Pese a todo, a finales de junio de 1915 Einstein había conseguido reunir muchos de los elementos de la relatividad general. Cuando el mes se acababa impartió durante una semana una serie de conferencias en la Universidad de Gotinga, una de las más importantes del mundo en matemáticas. Entre los genios destacaba David Hilbert. Einstein estaba particularmente interesado en explicarle todas las complejidades de la relatividad. Puede que demasiado interesado, como se iba a ver.

LA RIVALIDAD

La visita a Gotinga fue un éxito. Einstein contaba a un colega que había podido «convencer a Hilbert de la teoría de la relatividad general». Aún más efusivo fue en una carta a otro físico: «¡Estoy encantado con Hilbert!».

Hilbert estaba igualmente encantado con Einstein y sus ideas, hasta el punto de querer culminar el trabajo con lo que Einstein no había sido capaz de hacer hasta ese momento: deducir las ecuaciones que completarían la teoría.

Einstein supo de los intentos de Hilbert a principios de octubre de 1915, al tiempo que constataba que la versión de la teoría que entonces tenía, basada en un borrador que llevaba dos años elaborando, contenía errores graves. Las ecuaciones no trataban de manera adecuada el movimiento de rotación. Cayó además en la cuenta de que tampoco cumplían la covariancia general; es decir, que no hacían realmente que todas las formas de movimiento acelerado y no uniforme fuesen relativas. Y no explicaban del todo la anomalía que los astrónomos tenían observada en la órbita del planeta Mercurio: su perihelio (el punto en que más se acercaba al Sol) se desplazaba poco a poco de forma inexplicable para la física newtoniana o la teoría de Einstein tal y como era en ese momento.

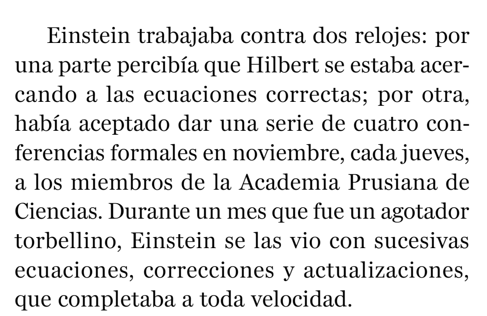
JUNIO DE 1915

El matemático David Hilbert asiste a una conferencia de Einstein sobre la relatividad general. Hilbert empieza a competir con Einstein por la formulación matemática de la teoría.



NOVIEMBRE DE 1915

En la cuarta de las conferencias que pronuncia en la Biblioteca Estatal Prusiana, Einstein presenta por fin el artículo que incluye sus ecuaciones de campo de la relatividad general.



VERANO Y OTOÑO DE 1915

Einstein vive solo, come y duerme intermitentemente, y se consuela con su violín mientras se bate con las ecuaciones de la relatividad general.



GETTY IMAGES

Einstein trabajaba contra dos relojes: por una parte percibía que Hilbert se estaba acercando a las ecuaciones correctas; por otra, había aceptado dar una serie de cuatro conferencias formales en noviembre, cada jueves, a los miembros de la Academia Prusiana de Ciencias. Durante un mes que fue un agotador torbellino, Einstein se las vio con sucesivas ecuaciones, correcciones y actualizaciones, que completaba a toda velocidad.

Incluso cuando ya se encontraba en el gran salón de la Biblioteca Estatal de Prusia el 4 de noviembre para impartir la primera de sus conferencias, seguía luchando con su teoría. «Durante los últimos cuatro años», empezaba, «he intentado formular una teoría general de la relatividad». Describió con gran franqueza los problemas que había encontrado y admitió que todavía no había dado con unas ecuaciones que funcionasen del todo.

Einstein sufría al mismo tiempo las agonías de uno de los frenesíes más intensos de creatividad científica de la historia y las crisis personales que vivía en su familia. Su mujer seguía escribiéndole para exigirle dinero y discutir las condiciones en que él podía ver a sus dos hijos. A través de una amistad, Marić le pidió que sus hijos no le visitaran en Berlín, donde podrían descubrir la relación con Elsa. Einstein aseguró al amigo que vivía solo y que su apartamento «solitario» tenía «casi la atmósfera de una iglesia». El amigo, conocedor del trabajo sobre la relatividad general, replicó: «Y con razón, porque actúan allí fuerzas divinas extraordinarias».

El mismo día que pronunció su primera conferencia escribió una carta conmovedora a su hijo mayor, Hans Albert, que vivía en Suiza:

> *Ayer recibí tu grata cartita y me alegró mucho. Temía que no quisieras volver a escribirme. [...] En cualquier caso, intentaré que pasemos un mes juntos cada año, para que veas que tienes un padre que te tiene apego y te quiere. Puedo enseñarte además muchas hermosas y buenas cosas que nadie más podría ofrecerte tan fácilmente. [...] Estos días he acabado uno de los mejores trabajos de mi vida; cuando seas mayor, te contaré cómo es.*

La carta acababa con una pequeña disculpa por parecer tan distraído: «A veces estoy tan inmerso en mi trabajo que me olvido de comer».

Einstein había establecido también una extraña relación con Hilbert. Sabía que el matemático de Gotinga había descubierto los errores de las ecuaciones del borrador. Temeroso de que se le adelantara, le envió una copia de la conferencia del 4 de noviembre y le contó que él mismo había descubierto los errores.

En la segunda conferencia, pronunciada el 11 de noviembre, Einstein impuso nuevas condiciones sobre las coordenadas y consiguió así que las ecuaciones tuvieran covariancia general. Pero no fue una mejora sustancial. Aunque estaba más cerca de la solución, avanzaba lentamente. De nuevo envió la conferencia a Hilbert y se interesó por sus progresos: «¡Mi curiosidad interfiere con mi trabajo!», le escribió.

La respuesta de Hilbert debió de inquietarle. Había encontrado una «solución a su [de Einstein] gran problema» y le invitaba a que lo visitara en Gotinga el 16 de noviembre para que tuviese el dudoso placer de escucharla. «Dado que le interesa tanto, me gustaría presentarle en detalle mi teoría el próximo martes. [...] Mi mujer y yo estaríamos encantados de alojarle». Hilbert se sintió obligado a añadir una posdata que dejaba con la miel en los labios y desconcertaba: «En la medida en que entiendo su último artículo, la solución que usted da es completamente distinta de la mía».

EL MOMENTO DE LA VERDAD

El lunes 15 de noviembre de 1915 Einstein escribió cuatro cartas que reflejaban sus tensiones personales y profesionales. A Hans Albert le prometía que le visitaría en Suiza por Navidad: «Tal vez sería mejor si estuviéramos solos en alguna parte», en una fonda donde tuviesen intimidad, le decía. «¿Qué te parece?»

También le escribió ese día a Marić en tono conciliador, agradeciéndole que estuviese dispuesta a «no socavar» sus relaciones con los críos. A un amigo le explicaba: «Acabo de modificar la teoría de la gravedad, porque me he dado cuenta de que había una laguna en mis pruebas anteriores [...]. Estoy deseando ir a Suiza a finales de año para ver a mi querido hijo».

Finalmente, declinó la invitación de Hilbert, sin ocultar su ansiedad: «Estoy muy intrigado por las indicaciones que contienen sus tarjetas postales, pero creo que no debo ir a Gotinga. [...] Estoy muy agotado y no deja de dolerme el estómago. [...] Si puede, envíeme unas galeradas de su trabajo para mitigar mi impaciencia».

Mientras se apresuraba a reformular su teoría, Einstein hizo un hallazgo que transformó su ansiedad en gozo. Revisó una vez más las ecuaciones para ver si daban el resultado correcto de la anomalía de la órbita de Mercurio. Predecían correctamente un desplazamiento del perihelio de unos 43 segundos de arco por siglo. Su emoción fue tanta que tuvo palpitaciones. Como le explicó a un colega: «No cupe en mí de gozo y excitación durante días». Exultante, le confesó a otro físico: «Los resultados del movimiento del perihelio de Mercurio me llenan de satisfacción. La quisquillosa precisión de la astronomía, que solía ridiculizar para mis adentros, ¡qué útil nos es!».

La mañana del 18 de noviembre, el día de la tercera conferencia, Einstein recibió el artículo de Hilbert y se vino abajo al comprobar cuánto se parecía a su propio trabajo. Le respondió a Hilbert concisamente y con el claro designio de afirmar su prioridad: «Su sistema de ecuaciones coincide exactamente, hasta donde alcanzo, con el que he encontrado estas semanas y he presentado a la Academia», escribía. «En el artículo que expondré hoy a la Academia deduzco cuantitativamente a partir de la relatividad general, sin hipótesis auxiliares, el movimiento del perihelio de Mercurio descubierto por Le Verrier. Ninguna teoría de la gravitación lo había conseguido hasta ahora».

Hilbert respondió amable y generosamente al día siguiente, sin reclamar para sí la prioridad. «Mi enhorabuena de todo corazón por conquistar el movimiento del perihelio», le escribía. «Si pudiera calcular tan rápido como usted, el electrón habría capitulado en mis ecuaciones y el átomo de hidrógeno habría presentado su nota de disculpas por no radiar.» Sin embargo, un día después, Hilbert envió un artículo a la revista científica de Gotinga con su versión de las ecuaciones de la relatividad general. El título que eligió, «Los fundamentos de la física», no era precisamente modesto.

No está claro con qué atención leyó Einstein el artículo de Hilbert o si influyó en sus pensamientos mientras preparaba la cuarta y culminante de sus conferencias. En cualquier caso, esa última del 25 de noviembre, titulada «Las ecuaciones del campo gravitacional», contenía el conjunto de ecuaciones covariantes que describía una teoría general de la relatividad.

Las ecuaciones no tenían para los profanos la viveza de la expresión $E = mc^2$. Aun así, usando la condensada notación tensorial, que comprime desperdigadas complejidades matemáticas en pequeños subíndices, el meollo de la ecuación de campo de Einstein definitiva es lo bastante compacto como para figurar en las camisetas de los entusiastas de la física. En una de sus muchas variantes puede escribirse como:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = 8\pi G T_{\mu\nu}.$$

El miembro de la izquierda, denominado hoy «tensor de Einstein» —que podemos escribir como $G_{\mu\nu}$—, describe la geometría de un espaciotiempo que se deforma en presencia de objetos masivos. El miembro de la derecha describe la distribución de materia y energía en el campo gravitatorio. La interacción entre ambos determina cómo curvan los objetos el espaciotiempo y, a su vez, cómo se mueven los objetos como consecuencia de esa curvatura.

Einstein sufrió al mismo tiempo las agonías de uno de los frenesíes más intensos de creatividad científica de la historia y las crisis personales que vivía en su familia

La disputa sobre la prioridad del descubrimiento de las ecuaciones de la relatividad general no ha cesado desde entonces. ¿Se adelantó Hilbert a Einstein? Lo cierto es que Einstein le había explicado la teoría subyacente en Gotinga, en el verano de 1915. Hilbert lo reconocía cortésmente en su artículo: «Las ecuaciones diferenciales de la gravitación concuerdan, a mi parecer, con la magnífica teoría de la relatividad general de Einstein». Luego lo resumiría diciendo que «Einstein hizo el trabajo, no los matemáticos».

Einstein y Hilbert restañaron su relación en cuestión de semanas. Hilbert propuso a Einstein como miembro de la Real Sociedad de Ciencias de Gotinga, y Einstein le agradeció el gesto en una carta que sostenía que dos hombres que habían vislumbrado teorías trascendentales no podían empequeñecerse con emociones terrenales. «Ha habido cierto resquemor entre nosotros, cuya causa no quiero analizar», escribía Einstein. «He luchado contra el sentimiento a ello asociado de

acritud, y con éxito completo. Vuelvo a pensar en usted con una cordialidad sin mácula, y le pido que intente hacer igual conmigo. Sería una verdadera lástima que dos tipos que han construido algo en un mundo sórdido no se honraran mutuamente con su amistad.»

«MIS MÁS ATREVIDOS SUEÑOS»

El orgullo de Einstein era comprensible. A los 36 años había revolucionado la concepción del universo. Su teoría de la relatividad general no era una mera interpretación de datos experimentales, ni el descubrimiento de unas leyes más precisas. Era una forma radicalmente nueva de ver la realidad.

Con su teoría de la relatividad especial, Einstein había enseñado que el espacio y el tiempo no existen de forma independiente, sino que forman una única entidad, el espaciotiempo. Ahora, con su teoría general de la relatividad, ese espaciotiempo dejaba de ser un mero contenedor de objetos y sucesos. Tenía una dinámica propia dictada por el movimiento de los objetos, que a su vez contribuía a determinar. La superficie de una cama elástica, por ejemplo, se curvará bajo el peso de una bola de jugar a los bolos y varias bolas de billar que rueden por ella, a la vez que la curvatura dinámica de la superficie determinará la trayectoria de todas esas bolas rodantes y hará que las de billar se muevan hacia la de bolos.

La curvatura y ondulación del espaciotiempo explicaba la gravitación, la equivalencia de esta con la aceleración y la relatividad general de todas las formas de movimiento. Para Paul Dirac, premio nóbel y pionero de la mecánica cuántica, se trataba «probablemente del mayor descubrimiento científico de todos los tiempos». Max Born, otro gigante de la física del siglo XX, consideraba que era «la mayor hazaña del pensamiento humano aplicado a la naturaleza, la más asombrosa combinación de agudeza filosófica, intuición física y habilidad matemática».

Einstein acabó exhausto. Su matrimonio se había venido abajo y la guerra asolaba Europa. Pero era más feliz que nunca. «Mis más atrevidos sueños se han hecho realidad», confió lleno de alegría a su mejor amigo, el ingeniero Michele Besso. «Covariancia *general*. Perihelio de Mercurio maravillosamente preciso». Firmaba así: «...satisfecho pero exhausto».

Cuando, años después, su hijo pequeño, Eduard, le preguntó por qué era tan famoso, Einstein le explicó mediante una imagen simple su intuición fundamental de que la gravedad era el curvarse del espaciotiempo. «Cuando un escarabajo ciego recorre la superficie de una rama curvada, no percibe que el camino que ha seguido está, en efecto, curvado. Yo tuve la suerte de percibir lo que el escarabajo no pudo.»

PARA SABER MÁS

Die Feldgleichungen der Gravitation. A. Einstein en *Preussische Akademie der Wissenschaften, Sitzungsberichte*, págs. 844-847, 2 de diciembre, 1915.
An interview with Einstein. I. Bernard Cohen en *Scientific American*, julio de 1955.
Einstein: His life and universe. Walter Isaacson. Simon & Schuster, 2007.

EN NUESTRO ARCHIVO

Einstein, Hilbert y la teoría general de la relatividad. Leo Corry en *IyC*, noviembre de 1998.

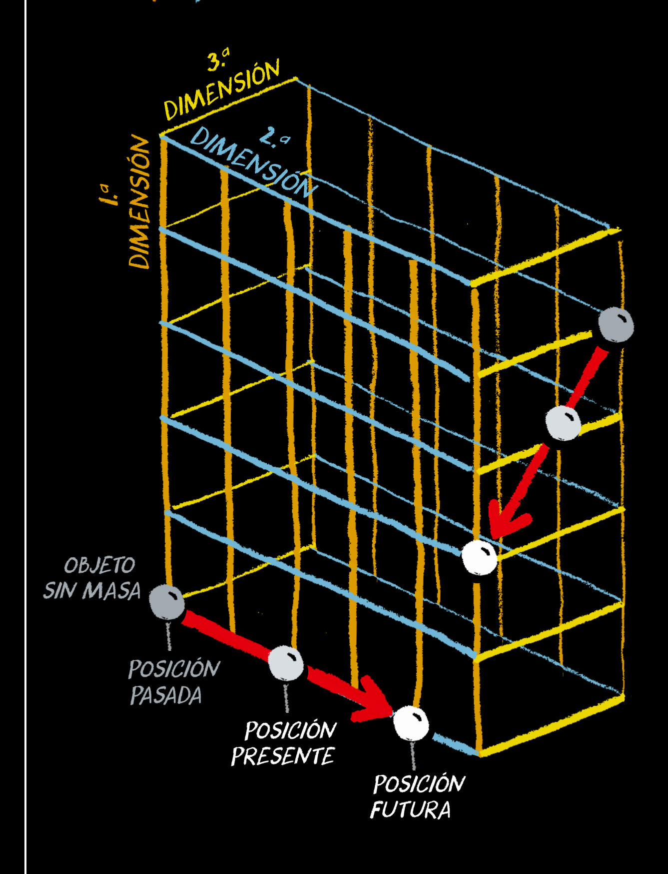
ASPECTOS BÁSICOS

Manual de relatividad

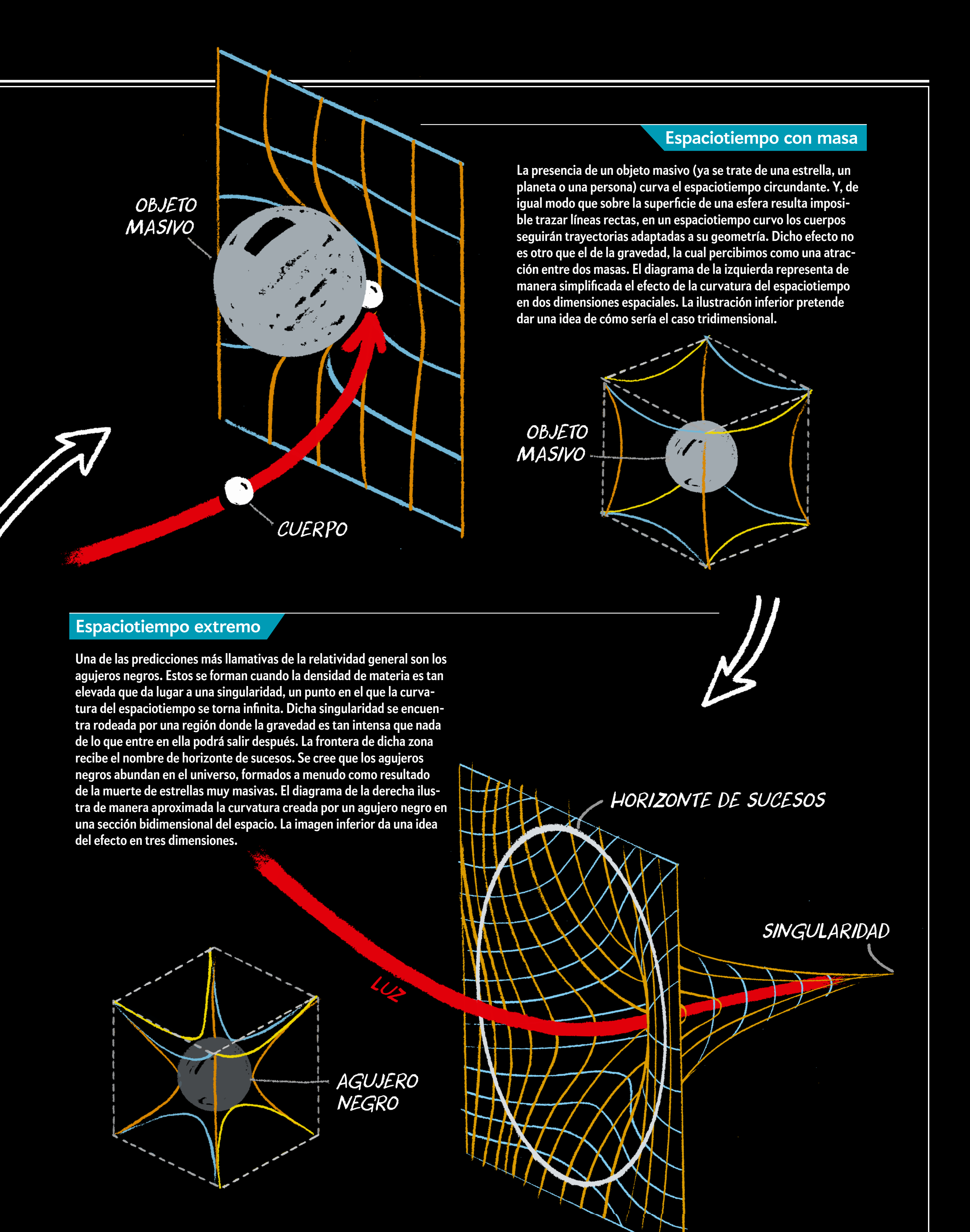
La relatividad general redefinió la noción de gravedad. En lugar de aparecer como una fuerza entre dos masas, la gravitación surge en ella como una simple consecuencia de la geometría del espacio y el tiempo. Einstein llegó a esa idea a partir de la teoría especial de la relatividad, la cual formuló diez años antes. Esta última trata el espacio y el tiempo como una sola entidad, el espaciotiempo (*abajo*). Según la relatividad general, la materia y la energía curvan el espaciotiempo, lo que modifica las trayectorias de los objetos que se mueven en él (*arriba a la derecha*). Al acumular una gran cantidad de materia en una región del espacio lo suficientemente pequeña, la curvatura puede tornarse infinita; el resultado es un agujero negro (*abajo a la derecha*).

Espaciotiempo sin masa

La teoría especial de la relatividad puso de manifiesto que el universo debe verse como un lugar con cuatro dimensiones: tres espaciales y una temporal. En ausencia de masa, el espaciotiempo puede asimilarse a un retículo en el que el camino más corto entre dos puntos es una línea recta. Dado que representar cuatro dimensiones en un papel resulta imposible, el diagrama inferior muestra las tres dimensiones espaciales y la posición de un objeto en sucesivos instantes.



NIGEL HOLMES



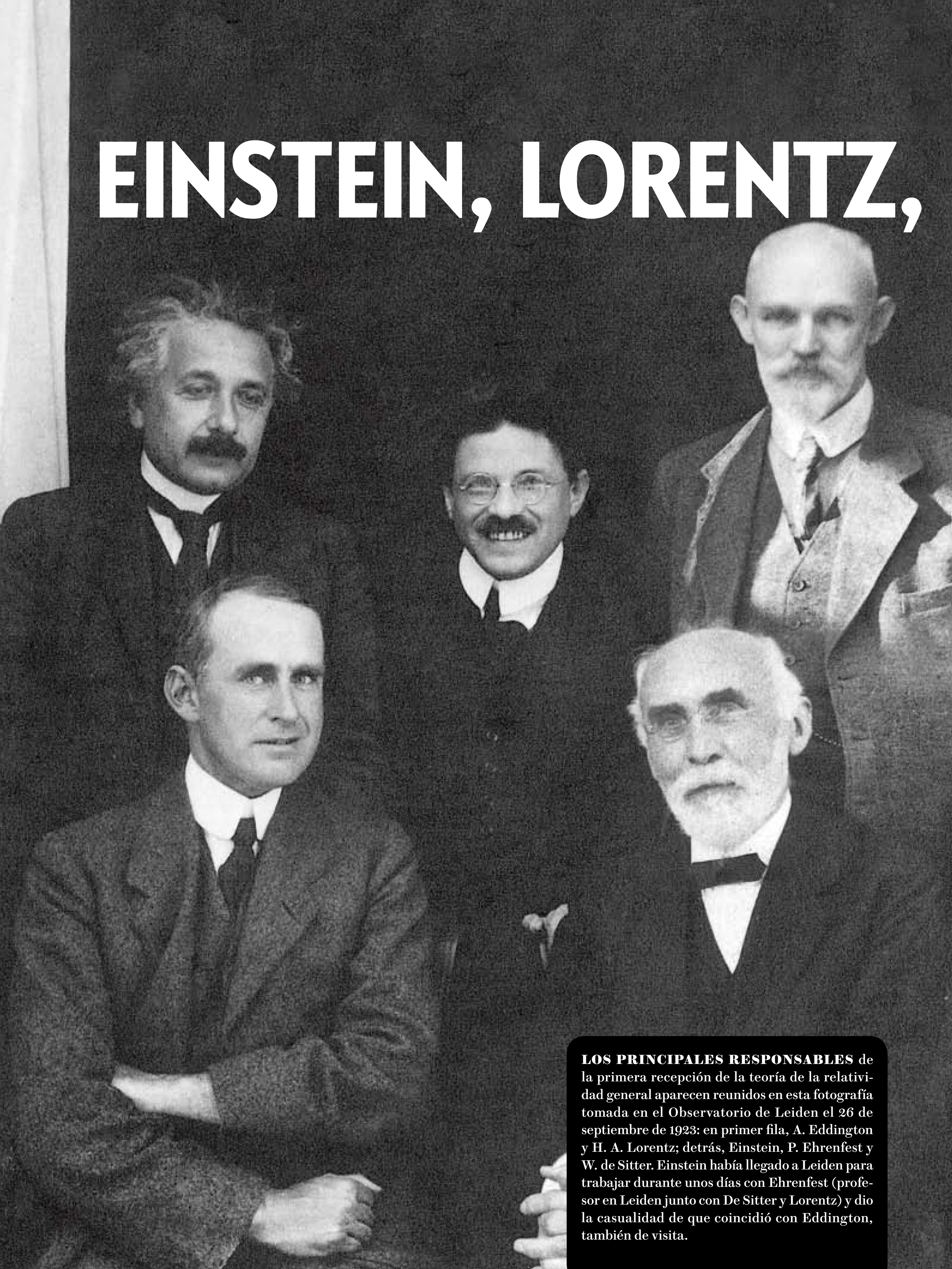
Espaciotiempo con masa

La presencia de un objeto masivo (ya se trate de una estrella, un planeta o una persona) curva el espaciotiempo circundante. Y, de igual modo que sobre la superficie de una esfera resulta imposible trazar líneas rectas, en un espaciotiempo curvo los cuerpos seguirán trayectorias adaptadas a su geometría. Dicho efecto no es otro que el de la gravedad, la cual percibimos como una atracción entre dos masas. El diagrama de la izquierda representa de manera simplificada el efecto de la curvatura del espaciotiempo en dos dimensiones espaciales. La ilustración inferior pretende dar una idea de cómo sería el caso tridimensional.

Espaciotiempo extremo

Una de las predicciones más llamativas de la relatividad general son los agujeros negros. Estos se forman cuando la densidad de materia es tan elevada que da lugar a una singularidad, un punto en el que la curvatura del espaciotiempo se torna infinita. Dicha singularidad se encuentra rodeada por una región donde la gravedad es tan intensa que nada de lo que entre en ella podrá salir después. La frontera de dicha zona recibe el nombre de horizonte de sucesos. Se cree que los agujeros negros abundan en el universo, formados a menudo como resultado de la muerte de estrellas muy masivas. El diagrama de la derecha ilustra de manera aproximada la curvatura creada por un agujero negro en una sección bidimensional del espacio. La imagen inferior da una idea del efecto en tres dimensiones.

EINSTEIN, LORENTZ,



LOS PRINCIPALES RESPONSABLES de la primera recepción de la teoría de la relatividad general aparecen reunidos en esta fotografía tomada en el Observatorio de Leiden el 26 de septiembre de 1923: en primer fila, A. Eddington y H. A. Lorentz; detrás, Einstein, P. Ehrenfest y W. de Sitter. Einstein había llegado a Leiden para trabajar durante unos días con Ehrenfest (profesor en Leiden junto con De Sitter y Lorentz) y dio la casualidad de que coincidió con Eddington, también de visita.

EDDINGTON, WEYL Y LA RELATIVIDAD GENERAL

A pesar de su complejidad, la teoría de la relatividad general encontró pronto defensores. Se preocuparon por desarrollar algunas de las implicaciones teóricas y confirmaron su predicción de la curvatura de los rayos de luz, lo que hizo de Einstein un personaje de fama mundial

José Manuel Sánchez Ron

El 25 de noviembre de 1915, tras una larga búsqueda que había esbozado en 1907 (cuando introdujo el «principio de equivalencia») y comenzado con dedicación plena en 1911, Albert Einstein (1879-1955) presentaba en la Academia Prusiana de Ciencias de Berlín, de la que era miembro desde 1914, una comunicación titulada «Las ecuaciones del campo gravitacional». Esta contenía las ecuaciones que todavía hoy, un siglo después, aceptamos para describir una de las cuatro fuerzas de la naturaleza, la gravedad. Por fin, había conseguido producir una teoría relativista de la gravitación: la teoría de la relatividad general.

EN SÍNTESIS

A pesar de su complejidad matemática y gran originalidad, la teoría de la relatividad general que Albert Einstein culminó en 1915 encontró pronto un pequeño pero selecto grupo de defensores: el físico H. A. Lorentz, sus discípulos A. D. Fokker y J. Droste, así como los astrónomos W. de Sitter y A. Eddington.

El problema del movimiento de *N* cuerpos en relatividad general o los modelos cosmológicos fueron las principales aportaciones de los primeros. Eddington se distinguió por su difusión de la teoría, así como por liderar la expedición que durante el eclipse de Sol de 1919 confirmó la predicción einsteiniana de la curvatura de los rayos de luz en presencia de un campo gravitacional. La confirmación catapultó a Einstein a la fama.

Ya antes de ese resultado, el matemático H. Weyl inauguró en 1918 un nuevo escenario para la relatividad general: la unificación de la gravitación y el electromagnetismo mediante una geometría más general que la de Riemann empleada por Einstein, quien pronto se sumó a aquel empeño unificador.

José Manuel Sánchez Ron es miembro de la Real Academia Española y catedrático de historia de la ciencia en el departamento de física teórica de la Universidad Autónoma de Madrid.



Se trataba de una construcción teórica que utilizaba un aparato matemático poco familiar para los físicos de entonces: la geometría riemanniana, o «cálculo diferencial absoluto», adecuada a geometrías no planas, un mundo de objetos matemáticos denominados tensores, aplicado, además, a un conjunto de diez ecuaciones no lineales en derivadas parciales.

En una fecha tan tardía como el 27 de mayo de 1929, Oliver Lodge, distinguido físico de la Universidad de Birmingham, confesaba al también notable Edmund Whittaker, catedrático en la Universidad de Edimburgo, sus problemas con aquella nueva física, debidos a sus carencias matemáticas:

> «Le agradezco que me haya enviado su conferencia sobre "¿Qué es la energía?". Pero estoy aterrado al ver que no puedo seguirla, esto es, entenderla, en absoluto. Más bien me sorprende que haya que introducir tensores en relación con algo tan fundamental como la energía. Ni siquiera sé lo que es un tensor. Sé que un vector es un escalar con dirección, además de magnitud. Uno ha tenido que acostumbrarse a los vectores. Supongo que un tensor es un vector con algo añadido. Pero ¿qué? ¿Es un giro o lo que Robert Ball llamaba un tirón? A mi edad ya no voy a aprender el cálculo tensorial pase lo que pase.»

«Ni siquiera sé lo que es un tensor», decía, así que ¿cómo iba a poder entender la relatividad general?

LORENTZ Y LA CONEXIÓN HOLANDESA

Cualquier científico tiene sus «héroes», colegas del pasado o del presente cuyas obras admira, bien por su originalidad, dominio de recursos técnicos o por lo que representan. Y esto se aplica incluso en algunos de los científicos cuyas obras constituyen hitos en la historia del pensamiento: Galileo admiraba a Arquímedes; Darwin, a Lyell; Maxwell, a Faraday y a Kelvin, y Planck, a Clausius. En el caso de Einstein, su héroe, el físico al que respetaba y quería por encima de todos, era el catedrático de Leiden Hendrik Antoon Lorentz (1853-1928). En el obituario que le dedicó, podemos leer:

> «Hacia fines de siglo, los físicos teóricos de todos los países consideraban a H. A. Lorentz como el más destacado de todos ellos, y con toda razón. Los físicos de nuestra época no tienen, en general, plena conciencia del papel decisivo que desempeñó H. A. Lorentz en la estructuración de las ideas fundamentales de la física teórica. La razón de este extraño hecho es que las ideas básicas de Lorentz han llegado a ser tan familiares que resulta difícil advertir lo audaces que fueron y hasta qué punto han simplificado los fundamentos de la física. [...] Lorentz edificó una teoría completa de todos los fenómenos electromagnéticos entonces conocidos, incluidos los de la electrodinámica de los cuerpos en movimiento. Es un trabajo de una coherencia, una lucidez y una belleza que muy pocas veces se alcanzan en una ciencia empírica. [...] Todo lo que salía de aquella mente superior era tan lúcido y bello como una gran obra de arte; y lo exponía con una facilidad y una sencillez que no he visto en nadie más. [...] Él significaba para mí, personalmente, más que ninguna otra persona que haya conocido en mi vida.»

La gran obra de Lorentz en la física fue su teoría del electrón [*véase* «La teoría del electrón cumple 120 años», por Frank Wilczek; Investigación y Ciencia, junio de 2012]. Con ella pretendía resolver los problemas que surgieron al combinar la mecánica de Newton y la electrodinámica de Maxwell, problemas que se manifestaban en experimentos como los que llevó a cabo el físico norteamericano Albert Michelson, solo (1881) o conjuntamente con Edward Morley (1887). En el curso de sus investigaciones teóricas, Lorentz introdujo las que se conocen como «transformaciones de Lorentz», que adquirieron su significado más profundo en la teoría de la relatividad especial que Einstein produjo en 1905, y de las que se deducen la relatividad de las medidas de longitudes y tiempos. Mientras que, para Lorentz, «sus» transformaciones no eran sino una especie de propiedad de las ecuaciones de la electrodinámica, para Einstein eran manifestaciones de la estructura del espacio y el tiempo.

Lorentz estuvo muy cerca de ser el creador de la teoría de la relatividad especial. Si no lo hizo fue por su excesivo apego a la idea del carácter absoluto del tiempo y del espacio como marco de referencia (para él, solo en ese «espacio absoluto», asociado al éter en reposo, el valor de la velocidad de la luz era, aproximadamente, 300.000 kilómetros por segundo). De hecho, Lorentz, científico ecuánime y generoso, tardó en comprender lo que diferenciaba su teoría del electrón de la relatividad especial. Para dilucidar esta cuestión, recomiendo la lectura de uno de sus libros, *The theory of electrons* (1909, segunda edición de 1916), basado en un curso que desarrolló en la Universidad de Columbia (Nueva York) en 1906. En la sección 194 de la primera edición, Lorentz escribía:

> «Se verá claro por lo dicho que las impresiones recibidas por los dos observadores A_0 y A serán iguales en todos los respectos. Sería imposible decidir cuál de los dos se mueve o permanece en reposo con respecto al éter y no habría ningún motivo para preferir los tiempos y longitudes medidos por uno a los determinados por el otro, ni tampoco para decir que uno de los dos está en posesión de los tiempos "verdaderos" o de las longitudes "verdaderas". Este es un punto en el que Einstein ha puesto especial hincapié en una teoría que parte de lo que él llama principio

> de relatividad. [...] No puedo hablar aquí de las muchas y muy interesantes aplicaciones que Einstein ha hecho de este principio. Sus resultados referentes a los fenómenos electromagnéticos y ópticos [...] coinciden, en lo principal, con lo que yo he obtenido en las páginas precedentes; la diferencia más importante estriba en que Einstein simplemente postula lo que yo he deducido, con alguna dificultad y no del todo satisfactoriamente, a partir de las ecuaciones fundamentales del campo electromagnético. Al hacer esto, puede, sin duda, tomar crédito por hacernos ver en los resultados negativos de experimentos como los de Michelson, Rayleigh y Brace, no una compensación fortuita de efectos contrapuestos, sino la manifestación de un principio general y fundamental.
>
> Sin embargo, creo que también se puede argumentar algo en favor de la forma en que yo he presentado la teoría. No puedo sino considerar el éter, que puede ser el asiento de un campo electromagnético con su energía y sus vibraciones, como dotado de un cierto grado de sustancialidad, por muy diferente que esta sea de toda la materia ordinaria. De acuerdo con esta línea de pensamiento, parece natural no suponer desde el comienzo que nunca puedan surgir diferencias entre un cuerpo que se mueve a través del éter [y otro que esté en reposo].»

Pero en algún momento entre 1909 y 1916, el año en que se publicó la segunda edición de su libro, Lorentz cambió de opinión. Así leemos en una de las notas (la 72) añadida a esa edición: «Si tuviese que escribir ahora el último capítulo, sin duda que daría un lugar más prominente a la teoría de la relatividad de Einstein, en la que la teoría de los fenómenos electromagnéticos en sistemas en movimiento gana una simplicidad que yo no fui capaz de conseguir. La causa principal de mi fracaso fue mi fijación en la idea de que solo la variable t puede ser considerada como el tiempo verdadero y que mi tiempo local t' no debía considerarse más que como una cantidad matemática auxiliar.» Por fin, había comprendido.

En el caso de la teoría de la relatividad general, la aceptación por parte de Lorentz fue mucho más rápida, como puede comprobarse en el siguiente párrafo de una carta que su discípulo Adriaan D. Fokker (1887-1972) escribía el 3 de febrero de 1916 a Niels Bohr:

> «En fecha reciente, Einstein ha acabado su teoría de la gravitación. Encontró la manera de poner sus ecuaciones en una forma absolutamente covariante y de explicar el movimiento secular del perihelio de Mercurio. Lorentz se ha entusiasmado *mucho* [con la teoría de Einstein] después de un período de duda y cálculos de prueba. Ehrenfest cree que tal vez después de cien años se demostrará que el descubrimiento de Einstein ha tenido, con mucho, más importancia que esta guerra [la Primera Guerra Mundial] sin final.»

Poco después, en una carta del 6 de junio de 1916, Lorentz informaba a Einstein: «En los últimos meses me he estado ocupando mucho de su teoría de la gravitación y de su teoría general de la relatividad, y también he impartido clases sobre ella, lo que me resultó muy útil. Ahora creo que comprendo la teoría en toda su gloria; examinándola con más cuidado fui capaz de superar todas las dificultades que encontré.» Como vemos, Lorentz no aceptó la relatividad general de una forma pasiva, sino que colaboró de manera importante a su desarrollo. Entre sus trabajos posteriores a 1915 figuran un buen número de artículos dedicados a la relatividad general que constituyen importantes contribuciones a la teoría. Aparte del estudio sobre el principio de mínima acción y las ecuaciones del campo gravitacional (1915), destacan sus trabajos sobre el problema del movimiento (el equivalente a la mecánica celeste en la dinámica newtoniana); esto es, cómo calcular el movimiento de N cuerpos en presencia de un campo gravitacional regido por las ecuaciones de la relatividad general, un problema extremadamente complejo.

Aunque Lorentz no fue nunca un hombre con muchos doctorandos, dos de ellos, Fokker y Johannes Droste (1886-1963), se ocuparon, siguiendo su consejo, de la relatividad general. Fokker completó su tesis sobre temas relacionados con la física cuántica en 1913 y poco después marchaba —con el asentimiento y ayuda de Lorentz— a trabajar con Einstein, con quien publicó en 1914 un artículo relativo a la teoría de Gunnar Nordström, que también pretendía describir la interacción gravitacional. Más tarde, en 1917, Fokker extendía el tratamiento variacional de Lorentz, completando después sus contribuciones a la relatividad general con un importante trabajo (1920) titulado «La precesión geodésica: Una consecuencia de la teoría de la gravitación de Einstein».

Lorentz estuvo muy cerca de ser el creador de la teoría de la relatividad especial. Si no lo hizo fue por su excesivo apego a la idea del carácter absoluto del tiempo y del espacio

Más importantes fueron los trabajos de Droste, que defendió en diciembre de 1916 su tesis sobre el problema del movimiento en relatividad general. Y que no solo fue dirigido e influenciado por Lorentz, sino que, además, colaboró con él. De hecho, fueron Lorentz y Droste (1917) los primeros en desarrollar de forma implícita lo que hoy llamamos formalismo de Einstein-Infeld-Hoffmann (1938) para obtener soluciones aproximadas del movimiento, según la relatividad general, de N cuerpos de dimensiones pequeñas comparadas con sus distancias mutuas y que se mueven con velocidades pequeñas. Incluso el mismo Einstein elogió las contribuciones de Lorentz y Droste, aunque, aparentemente, las olvidó, tratando años más tarde como problemas todavía sin resolver las cuestiones que estos habían abordado. Y es que los trabajos de Lorentz y Droste pasaron desapercibidos debido a que se publicaron en holandés y, al contrario que otros artículos de Lorentz, no aparecieron enseguida en la versión en inglés que publicaba la Academia de Ciencias holandesa, probablemente debido a las limitaciones asociadas a la guerra entonces en curso. Esa versión inglesa apareció en 1937, en el volumen V de los *Collected papers* de Lorentz.

Gracias al impulso de Lorentz, Leiden se convirtió en un centro importante para el desarrollo de la relatividad general. Sin duda, también ayudó la presencia de Ehrenfest, sucesor de

Lorentz en su cátedra, quien, pese a no contribuir prácticamente en nada al desarrollo de la relatividad general, fue importante por su estrecha amistad con Einstein y por su capacidad didáctica e interés por la formación de los estudiantes de Leiden. De hecho, a instancias de Ehrenfest, y con el apoyo de Lorentz, Einstein fue nombrado catedrático supernumerario de la Universidad de Leiden a comienzos de los años veinte.

Hubo un tercer científico involucrado de manera destacada en el progreso de la relatividad general: Willem de Sitter (1872-1934). Titular de la cátedra de astronomía teórica de Leiden, De Sitter había sido uno de los primeros astrónomos en interesarse por los problemas astronómicos que se derivaban de la relatividad especial. En 1913 escribió una nota en la que intentaba demostrar que la teoría de emisión de Walther Ritz (en la que la velocidad de la luz dependía del movimiento de la fuente) conducía a resultados contradictorios con las observaciones realizadas en sistemas de estrellas dobles. En lo que al desarrollo de la relatividad general se refiere, la importancia de De Sitter radica en una serie de tres artículos que publicó entre 1916 y 1917 en la revista inglesa *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, donde pasaba revista de forma completa y detallada a la teoría de Einstein.

1915-1916 eran, no lo olvidemos, años en los que la Primera Guerra Mundial se encontraba en todo su apogeo. No era trivial en absoluto el que científicos de países beligerantes como Alemania e Inglaterra pudieran mantener relaciones; Holanda, en su condición neutral, podía actuar como puente. Los tres artículos de De Sitter —con quien Einstein mantenía una relación frecuente— sirvieron para introducir la relatividad general en Inglaterra, influyendo en la forma en que esta llegó a entenderse en ese país. El que se evitase así un retraso de varios años en la llegada de la teoría de Einstein a Inglaterra tuvo como consecuencia que fueran precisamente astrónomos ingleses, bajo la dirección de Arthur Eddington (1882-1944), catedrático de astronomía en la Universidad de Cambridge, y Frank Dyson (1868-1939), el Astrónomo Real, quienes en mayo de 1919 organizasen dos expediciones para observar desde la isla de Príncipe, en el golfo de Guinea, y desde Sobral, al norte de Brasil, un eclipse solar con el que se demostró que una de las tres primeras predicciones de la relatividad general, la concerniente a la curvatura de los rayos de luz debida a la gravitación, era correcta.


№ 068

prof einstein haberlandstrasse 5

berlin w

Telegraphie des Deutschen Reichs

Berlin,

s gravenhage 0046 21/19 22/9 10.40

eddington fand sternverschiebung am sonnenrand vorlaeufig grosse

zwischen neun zehntel sekunde und doppelten = Lorentz +

TELEGRAMA que H. A. Lorentz, desde la neutral Holanda, envió a Einstein el 22 de septiembre de 1919, anunciándole los buenos resultados de la expedición británica que A. Eddington había organizado para comprobar, a través de la observación de un eclipse solar, una de las predicciones de la relatividad general: «Eddington ha encontrado desplazamiento estelar en el limbo solar, valor provisional entre nueve décimos de un segundo y el doble de esto.»

CORTESÍA DEL MUSEO BOERHAAVE DE LEIDEN

EDDINGTON, EL MENSAJERO DE LA RELATIVIDAD

Casi tan pronto como empezó a recibir información de la teoría final de Einstein a través de De Sitter, Eddington, uno de los líderes mundiales en astrofísica, ayudó a organizar una discusión sobre gravitación que tuvo lugar en la reunión anual de la Asociación Británica para el Avance de la Ciencia celebrada del 5 al 9 de septiembre de 1916 y en la que habló de la nueva teoría de Einstein. Poco después, el ingeniero, empresario y astrónomo aficionado británico Adolphus Lindemann y su hijo Frederick (más conocido como vizconde Cherwell, un título que recibió en 1956), físico, publicaron un artículo en el número de diciembre de 1916 de *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* que trataba de la fotografía de estrellas a la luz del día y en el que indicaban métodos para comprobar la hipótesis de Einstein sobre «la refracción de la luz por un campo gravitatorio», como ellos la llamaban. En 1918, por encargo de la Sociedad Física londinense, Eddington publicó un informe que fue muy leído (se reimprimió en 1920): *Report on the relativity theory of gravitation*. Se trataba de un librito de 91 páginas, que, de una manera sencilla pero sin prescindir en absoluto del análisis matemático, presentaba los fundamentos básicos de las teorías especial y general de la relatividad. El camino estaba así preparado para la organización de la expedición al eclipse de 1919.

La idea del viaje había surgido de Dyson. Su biógrafa, Margaret Wilson, señalaba en *Ninth Astronomer Royal: The life of Frank Watson Dyson* (1951):

> «En marzo de 1917, cuando la situación de la guerra todavía parecía desesperada y la posibilidad de enviar expediciones para observar eclipses en el extranjero a duras penas se podía contemplar, Dyson llamó la atención sobre el hecho de que el eclipse del 29 de mayo de 1919 bien podría tener una importancia única, ya que proporcionaría una oportunidad de comprobar la teoría de la relatividad de Einstein que, si se dejase pasar, podría no volver a tener lugar de nuevo en casi veinte años. A lo largo de 1918, siguió adelante con todos los preparativos necesarios. Como cabeza del Comité Conjunto Permanente para Eclipses de la Real Sociedad y de la Real Sociedad Astronómica, él fue el espíritu motriz del proyecto.»

La expedición, a la que se sumó Eddington, se planeó para comprobar si los rayos de luz experimentaban la desviación que preveía la relatividad general (1,75 segundos de arco) al pasar por las proximidades de la superficie del Sol los rayos procedentes de estrellas. Para ello era imprescindible un eclipse solar total: al ocultar la Luna la luz del Sol, sería posible observar las estrellas en la vecindad del disco solar, al menos las más luminosas; debido a la curvatura de los rayos procedentes de las estrellas y a que los astrónomos fijarían la posición como si esos rayos llegasen a lo largo de líneas rectas, las fotografías que se tomasen durante la totalidad darían una situación de

Crónica de una expedición decisiva

Arthur Eddington explicó algunos detalles de la expedición del eclipse de 1919 en un capítulo de un libro colectivo, *Background to modern science* (1938). Esto es lo que dijo entonces:

VARIOS MEDIOS de comunicación se hicieron eco del logro de la expedición británica. La portada de *The Illustrated London News* del 22 de noviembre de 1919 ofreció una explicación de la misma con todo detalle.

THE ILLUSTRATED LONDON NEWS

«Deseo dedicar los pocos minutos que restan al acontecimiento más impresionante en que recuerdo haber intervenido en astronomía, a saber, la comprobación de la predicción de Einstein sobre la desviación de la luz en el eclipse de 1919. Las circunstancias eran excepcionales. Los planes habían empezado a prepararse en 1918, durante la guerra, y no se supo hasta última hora si habría alguna posibilidad de que pudiesen emprenderse las expediciones. Pero convenía mucho no desperdiciar el eclipse de 1919, porque tenía lugar en un campo estelar excepcionalmente bueno; ninguna de las expediciones subsiguientes ha contado con esa ventaja. En Greenwich se organizaron dos expediciones por Sir Frank Dyson, el Astrónomo Real. Una debía ir a Sobral, en Brasil; la otra, a la isla de Príncipe, en África Occidental. Era imposible obtener ningún trabajo hecho por los fabricantes de instrumentos hasta después del armisticio; y como las expediciones debían partir en febrero, hubo una tremenda fiebre de preparación. El grupo de Brasil tuvo un tiempo perfecto para el eclipse; debido a circunstancias accidentales, sus observaciones no pudieron ser reducidas hasta meses más tarde, pero al fin ofrecieron la confirmación más concluyente. Yo fui a la isla de Príncipe; allí, el día del eclipse se presentó con lluvia y el cielo cubierto de nubes. Casi perdimos toda esperanza. Cerca de la totalidad, el Sol empezó a brillar débilmente y nosotros llevamos a cabo el programa esperando que las condiciones no fueran tan malas como parecían. La nube debió de haberse disipado antes del fin de la totalidad, porque entre varios fracasos obtuvimos dos placas que presentaban las deseadas imágenes de las estrellas. Estas fueron comparadas con las placas ya impresionadas por el mismo campo estelar en un tiempo en el que el Sol estaba en otra parte, de tal modo que la diferencia indicaba el aparente desplazamiento de las estrellas, debido a la desviación de los rayos de luz al pasar cerca del Sol.

Tal como el problema se nos presentaba, había tres posibilidades. Podía no haber en absoluto desviación, esto es, la luz podía no estar influida por la gravitación. Podía haber una media desviación, lo que significaría que la luz estaba sujeta a la gravitación, como Newton había sugerido, y obedecía, por tanto, a la simple ley newtoniana. O podía haber una desviación completa, confirmando así la ley de Einstein, en lugar de la de Newton. Recuerdo a Dyson explicando todo esto a mi compañero [Edwin Turner] Cottingham, quien sacó, como idea principal, que cuanto mayor fuese el resultado, más sensacional sería. "¿Qué ocurrirá si obtenemos el doble de la desviación?" "Que Eddington se volverá loco y usted tendrá que regresar solo", respondió Dyson.

Se habían tomado disposiciones para medir las placas en el mismo lugar, no enteramente por impaciencia, sino como una precaución contra algún accidente en el viaje de regreso. Ello permitió que una de las placas bien impresionadas fuera examinada inmediatamente. Los cálculos que tuvieron que hacerse fueron muchos, como sucede en todas las mediciones astronómicas, para que una placa pudiera decidir virtualmente la cuestión —aunque, por supuesto, debía buscarse la confirmación por otras—. Tres días después del eclipse, cuando se llegó a las últimas líneas de los cálculos, supe que la teoría de Einstein había resistido la prueba y el nuevo punto de vista del pensamiento científico debía prevalecer. Cottingham no tuvo que volver solo a su casa.»

las estrellas diferente de la que se mediría cuando el Sol no estuviese presente.

Los integrantes de la expedición partieron del puerto de Liverpool el mismo día, el 8 de marzo de 1919; el grupo encabezado por Eddington llegó a la isla de Príncipe el 23 de abril. En total, Eddington y sus ayudantes tomaron ese día dieciséis fotografías, la mayoría sin valor debido a las nubes que aparecían de forma intermitente; solo dos resultaron aprovechables y pudieron compararse con las que se habían tomado de la misma zona estelar meses antes en Inglaterra. Las fotografías obtenidas en Sobral, mucho mejores, confirmaron los resultados provisionales de Eddington cuando se procedió a las correspondientes mediciones ya de regreso en Inglaterra (las fotografías de Sobral mostraron una desviación de 1,98 segundos de arco con un error de ± 0,12, mientras que las de Príncipe daban 1,61 ± 0,30 segundos de arco). La expedición fue, por consiguiente, un éxito.

Einstein supo de los resultados obtenidos por los británicos a través de un telegrama que Lorentz le envió desde la neutral Leiden el 22 de septiembre —pese a haber terminado la guerra, la comunicación entre Alemania e Inglaterra era casi imposible—. Las conclusiones se presentaron en una comunicación firmada por Dyson, Eddington y Charles Davidson, que fue recibida en la Real Sociedad londinense el 30 de octubre de 1919. Antes de que se publicase en *Philosophical Transactions*, se leyó en una reunión conjunta de la Real Sociedad y la Real Sociedad Astronómica, celebrada el 6 de noviembre en el edificio Burlington House, muy cerca de Piccadilly Circus. Una audiencia numerosa, formada principalmente por los miembros de ambas instituciones científicas, se reunió bajo la presidencia de J. J. Thomson, quien, tras haber dejado la dirección del Laboratorio Cavendish de Cambridge (le sustituyó Ernest Rutherford), estaba al mando de la Real Sociedad. En el libro *Science and the modern world*, publicado en 1926, Alfred North Whitehead, distinguido matemático y filósofo (fue autor, junto con Bertrand Russell, del monumental *Principia Mathematica*, 1910-1913) que asistió a aquella reunión, describía así el ambiente que la rodeó:

> «Toda la atmósfera de tenso interés era exactamente la de una tragedia griega: nosotros éramos el coro comentando el decreto del destino revelado en el desarrollo de un incidente supremo. Había una cualidad dramática en la misma representación; el ceremonial tradicional y, en el trasfondo, el retrato de Newton para recordarnos que la mayor de las generalizaciones científicas iba a recibir ahora, después de más de dos siglos, su primera modificación.»

El 7 de noviembre, esto es, justo el día después, *The Times* anunciaba:



EINSTEIN EN LA PORTADA del *Berliner Illustrirte Zeitung* del 14 de diciembre de 1919. La primera vez que una publicación alemana lo presentaba como «un nuevo grande de la historia mundial».

BERLINER ILLUSTRIRTE ZEITUNG

«Revolución en ciencia. Nueva teoría del universo. Ideas newtonianas desbancadas.» La ola de artículos periodísticos continuó con intensidad creciente. Inicialmente fue sobre todo en Gran Bretaña, Estados Unidos y Alemania donde más atención se prestó a la nueva teoría einsteiniana del espaciotiempo, pero pronto el «fenómeno Einstein» se extendió a otras naciones. El 1 de diciembre de 1919, menos de un mes después de la reunión de Burlington House, Eddington escribía a Einstein:

> «Nuestros resultados fueron anunciados el 6 de noviembre y probablemente ya sabe usted que desde entonces toda Inglaterra ha estado hablando de su teoría. Ha provocado una impresión tremenda; y, aunque el interés popular se amortiguará, existe un inequívoco entusiasmo en los círculos científicos y acaso más en particular en esta universidad [Cambridge].
>
> He estado muy ocupado impartiendo conferencias y escribiendo sobre su teoría. Mi *Report on relativity* se ha agotado y ahora se está volviendo a imprimir. Esto demuestra un ansia de conocer el tema, ya que no es un libro fácil de digerir. Hace algunos días tuve una enorme audiencia en la Sociedad Filosófica de Cambridge y cientos fueron rechazados, incapaces de acercarse a la sala.»

Eddington se equivocaba en una cosa: el interés popular por las teorías de Einstein no disminuyó. Una década después de la anterior carta, el 11 de febrero de 1929, Eddington informaba a Einstein: «Le divertirá saber que uno de nuestros grandes almacenes de Londres (Selfridges) ha expuesto en el escaparate su trabajo (las seis páginas pegadas de lado a lado), de forma que los transeúntes puedan leerlo al pasar. ¡Grandes multitudes se agrupan para leerlo!» Y el artículo en cuestión no era fácil; se refería a una de las versiones de teoría del campo unitario que Einstein formuló.

WEYL Y LA UNIFICACIÓN DE LAS FUERZAS

Una de las características de la historia de la relatividad general es que, durante décadas, su desarrollo estuvo principalmente en manos de matemáticos. Estimulados por el poder de la nueva teoría, algunos de ellos analizaron los fundamentos de la geometría de Riemann. Así, en 1917, Gerhard Hessenberg, catedrático de matemáticas en la Escuela Técnica de Breslau (Wroclaw, Polonia, en la actualidad), y Tullio Levi-Civita, catedrático de mecánica racional en la Universidad de Padua, junto con Gregorio Ricci-Curbastro, autor en 1900 de un artículo seminal sobre la geometría riemanniana, publicaron sendos trabajos en los que señalaban que la formulación natural de esa geometría se basaba en la noción de «transporte paralelo infinitesi-



HERMANN WEYL, uno de los matemáticos más destacados del siglo xx, arrojó nueva luz a la formulación de la teoría de Einstein.

WIKIMEDIA COMMONS/ETH-BIBLIOTHEK ZÜRICH/CC BY SA 3.0

mal de un vector», algo que también hizo el año siguiente el matemático holandés Jan Arnouldus Schouten.

Conociendo estos estudios, en 1918 uno de los matemáticos más distinguidos del siglo xx, Hermann Weyl (1885-1955), desarrolló una generalización de la geometría de Riemann en la que, al transportar paralelamente un vector, el valor de su módulo (es decir, su «longitud») dependía del camino que se siguiera en tal transporte. A consecuencia de esa generalización, el nuevo espacio (al que suele llamarse «espacio de Weyl») necesitaba, para quedar definido, el tensor métrico $g_{\alpha\beta}$ de la relatividad general, pero también un cuadrivector, ϕ_{α}. Con estas cuatro nuevas variables, Weyl argumentaba que podía introducir (esto es, «geometrizar») el campo electromagnético, en una formulación que unificaría gravitación y electromagnetismo.

Matemático permeable a la física y a la filosofía, Weyl escogió para presentar sus ideas geométricas un libro que tituló *Raum-Zeit-Materie. Vorlesungen uber allgemeine Relativitätstheorie* («Espacio-tiempo-materia: Conferencias sobre relatividad general», 1918). Cuando informó a Einstein del contenido de sus investigaciones y le envió su obra, este quedó fascinado. El 8 de marzo de 1918, Einstein escribía a Weyl:

> «Estoy leyendo con genuino deleite las pruebas de su libro, que voy recibiendo página a página. Es como una pieza sinfónica maestra. Cada palabra tiene su relación con el conjunto, y el diseño de la obra es grandioso. ¡Que magnífico método es el desplazamiento infinitesimal de vectores para deducir el tensor de Riemann! Cuán naturalmente surge todo. Y ahora ha dado usted a luz al niño que yo no pude obtener: ¡la construcción de las ecuaciones de Maxwell a partir de los $g_{\alpha\beta}$!»

Es cierto que Einstein enseguida encontró puntos (consecuencias físicas) con los que estaba en desacuerdo: «H. Weyl», escribía a David Hilbert el 12 de abril de 1918, «ha presentado a la Academia de aquí [la Prusiana de Ciencias] a través de mí un artículo altamente interesante, en el que busca comprender la gravitación y el electromagnetismo como un sistema de conceptos geométricamente unificado. Matemáticamente, la cosa es maravillosa. Pero físicamente no lo puedo aceptar». Sin embargo, no olvidó la lección que el ejemplo del intento de Weyl implicaba. Nuevas matemáticas, generalizaciones del espacio riemanniano que había utilizado para la relatividad general, podían abrir el camino para resolver el problema que, siguiendo a Weyl, él también asumió: encontrar una teoría geométrica unitaria de la gravitación y el electromagnetismo, una «teoría unificada de campos».

A ese camino pronto se unieron otros como el propio Eddington, que en 1921 introdujo la idea de basar una teoría unitaria de campos en la «conexión afín» y no en la métrica. Una idea que Einstein adoptó poco después (1923), aunque pronto la abandonó, para retomarla junto con algunos de sus colaboradores en la década de 1940 (Erwin Schrödinger también se sumó a este empeño). La principal modificación introducida entonces fue la utilización de una conexión afín y un tensor métrico no simétricos; se pensaba que de esta forma se ampliaban los grados de libertad existentes en la teoría, grados que podían emplearse para introducir el campo electromagnético en la estructura geométrica del espaciotiempo.

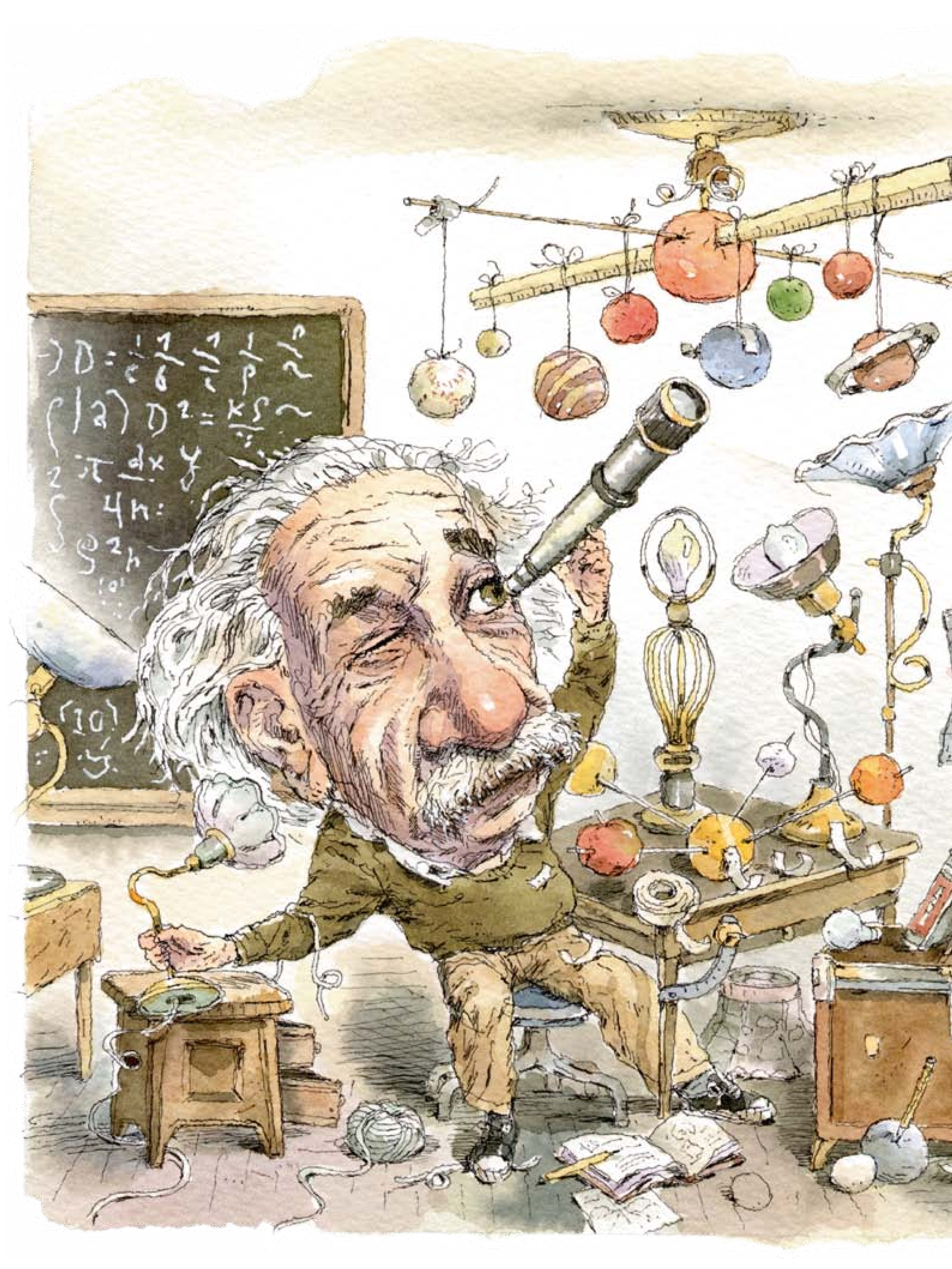
Aunque no puede ni debe reducirse la obra de Einstein posterior a 1920 a la búsqueda de una teoría unificada de campos —ahí están, por ejemplo, sus aportaciones, fundamentales, a la física cuántica, las lentes gravitacionales o la aproximación de Einstein-Infeld-Hoffmann—, sí es cierto que nunca abandonó el proyecto, a la postre un sueño vano, de encontrar una teoría que uniera, en el espíritu geométrico de la relatividad general, gravitación y electromagnético [*véase* «Sobre la teoría generalizada de la gravitación», por Albert Einstein; *en este mismo número*].

PARA SABER MÁS

Einstein, relativity and the press: The myth of incomprehensibility. Jeffrey Crelinsten en *The Physics Teacher* 18, págs. 115-122, febrero de 1980.
Eddington and Einstein. John Stachel en *The Prism of Science*, dirigido por E. Ullmann-Margalit, págs. 225-250. Reidel, Dordrecht 1986.
The reception of general relativity among British physicists and mathematicians (1915-1930). José M. Sánchez Ron en *Studies in the History of General Relativity*, dirigido por Jean Eisenstaedt y Anne Kox, págs. 57-88. Birkhäuser, Boston 1992.
Einstein's unification. Jeroen Van Dongen. Cambridge University Press, Cambridge 2010.
Hermann Weyl's *Raum-Zeit-Materie* and a general introduction to his scientific work. Dirigido por Erhard Scholz. Birkhäuser, Basilea, 2001.
The collected papers of Albert Einstein, vols. 6-13. Princeton University Press, Princeton 1996-2012.
Albert Einstein: Su vida, su obra y su mundo. José M. Sánchez Ron. Crítica, Barcelona, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Arthur Stanley Eddington. Sir William McCrea en *IyC*, agosto de 1991.
Espacio, tiempo y gravitación. Silvio Bergia en *Einstein*, colección TEMAS de *IyC* n.º 40, 2005.



HISTORIA DE LA CIENCIA

LOS ERRORES DE EINSTEIN

Todos cometemos fallos, pero los del legendario físico resultan particularmente esclarecedores

Lawrence M. Krauss

Como todos los mortales, Albert Einstein cometió errores. Y al igual que la mayoría de los físicos, en ocasiones también los publicó. La gran parte de nosotros preferiríamos que nuestros deslices cayesen felizmente en el olvido, pero en el caso de Einstein incluso sus equivocaciones son dignas de análisis. Estas no solo ilustran la evolución de su pensamiento, sino la manera en que fue cambiando la visión científica del universo durante su vida. Los errores de Einstein ponen también de manifiesto los retos del descubrimiento científico. A la hora de ampliar las fronteras del conocimiento, resulta difícil saber si las ideas que se escriben sobre un papel corresponden o no a fenómenos reales, y si una idea rompedora conducirá a una compresión más profunda de la naturaleza o acabará disolviéndose sin más.

Con el paso de los años, Einstein, el mismo hombre que redefinió el significado del espacio y el tiempo, subestimó y criticó sus propios descubrimientos con una frecuencia que resulta sorprendente. En la actualidad, tres florecientes áreas de la cosmología se asientan sobre ideas que Einstein juzgó de manera errónea: las lentes gravitatorias, las ondas gravitacionales y la expansión acelerada del universo.

EN SÍNTESIS

A pesar de su indiscutible genio, en varias ocasiones Einstein fue incapaz de captar el significado de algunas de sus ideas más profundas. Otras veces subestimó la importancia de sus propios hallazgos.

Entre otros errores, Einstein menospreció la importancia del efecto de lente gravitatoria, puso en duda la existencia de las ondas gravitacionales y no supo ver que su teoría predecía un universo dinámico.

Un examen de las equivocaciones de Einstein permite entender el cauce de su pensamiento y ofrece una interesante perspectiva histórica sobre algunas de las ideas más importantes de la cosmología moderna.

JOHN CUNEO

LA LENTE DISTORSIONADA DE EINSTEIN

En el caso de las lentes gravitatorias, el principal fallo del físico alemán fue subestimar una de sus predicciones más famosas: la deflexión de los rayos de luz en presencia de la gravedad. En diciembre de 1936, Einstein publicó en *Science* un breve artículo titulado «Acción de tipo lente de una estrella debida a la desviación de la luz en el campo gravitatorio». Su nota comenzaba con una candidez imposible de encontrar hoy en un artículo científico: *«Hace algún tiempo, R. W. Mandl [un ingeniero checo] me visitó y me pidió que publicase los resultados de un breve cálculo que realicé a petición suya. Esta nota tiene como objetivo cumplir su deseo»*.

El «breve cálculo» examinaba la posibilidad de una deflexión extrema de la luz por efecto de la gravedad. Para Einstein fue fácil demostrar que, si los rayos de luz procedentes de una fuente lejana pasaban lo suficientemente cerca de un cuerpo muy masivo, se curvarían tanto que podrían incluso converger y producir una imagen aumentada o múltiple de la fuente distante. El resultado sería similar al causado por una lente, razón a la que el fenómeno debe su nombre. Hoy, las lentes gravitatorias se han convertido en una de las herramientas observacionales más importantes de la cosmología, ya que proporcionan un método para deducir la distribución de masa en el universo incluso en aquellos lugares donde la materia no puede verse.

Sin embargo, Einstein no fue consciente ni de la magnitud del efecto ni de su importancia. En su artículo de 1936, concluyó que la multiplicación de imágenes sería tan minúscula que no podría medirse, lo que sin duda explica el tono autoexculpatorio de la introducción del artículo. Técnicamente su conclusión era correcta, pero parece que a Einstein no se le ocurrió pensar que las estrellas nos son los únicos objetos que pueden curvar la trayectoria de los rayos de luz.

El despiste de Einstein se antoja aún más sorprendente si tenemos en cuenta el enorme impacto que dicho efecto había ejercido en su reputación científica. La deflexión de los rayos de luz por un objeto de gran masa fue una de las predicciones clave de la teoría de la relatividad general. En 1919, una expedición dirigida por el físico Arthur Eddington observó un eclipse solar y comprobó que, al pasar cerca del Sol, la luz de las estrellas experimentaba la deflexión que Einstein había predicho. La confirmación experimental de la teoría ocupó portadas en periódicos de todo el mundo. Sin duda, a la fascinación del público contribuyó el hecho de que, recién acabada la Primera Guerra Mundial, una expedición británica confirmase el trabajo de un físico alemán. Como consecuencia, Einstein alcanzó un nivel de fama científica inigualado desde entonces [*véase* «Einstein, Lorentz, Eddington, Weyl y la relatividad general», *en este mismo número*].

Pero la historia admite una vuelta de tuerca más. Einstein había realizado el mismo cálculo unos años antes, en 1912. Tampoco entonces supo reconocer la importancia del resultado para la cosmología. Pero, además, aquel primer cálculo adolecía de un problema que pudo haber tenido consecuencias desastrosas: Einstein había usado una versión primitiva de la relatividad general, en la que la predicción de la deflexión de los rayos de luz era la mitad de su valor real. Una expedición se propuso medir el efecto aprovechando un eclipse de Sol que tendría lugar en 1914, pero la empresa no se llevó a término por el estallido de la Primera Guerra Mundial. Einstein tuvo suerte de que la observación no se realizase entonces, ya que los resultados habrían estado en desacuerdo con su teoría. De qué manera habría afectado aquello a su vida y a la historia de la ciencia queda como materia de especulación.

Tras la publicación de su artículo de 1936, Einstein escribió al editor de *Science* con una valoración de su trabajo que, aunque incorrecta, no deja de mostrar cierto encanto: *«Permítame agradecerle su ayuda con esta pequeña publicación, que el Sr. Mandl me ha obligado a escribir. Es de poco valor, pero ha hecho feliz al pobre hombre»*.

Lo que Einstein pasó por alto —como bien señaló el irascible pero brillante Fritz Zwicky, astrónomo del Caltech, en un artículo enviado a *Physical Review* pocos meses después de la publicación de Einstein— fue que las estrellas forman galaxias. Y aunque es cierto que el efecto de lente gravitatoria producido por una estrella aislada puede resultar inobservable, no ocurre lo mismo con una galaxia con 100.000 millones de estrellas.

El artículo de Zwicky, de una sola página, era notable. En él propuso tres aplicaciones de las lentes gravitatorias que presagiaban casi todos los usos que se les han dado desde entonces: comprobar la teoría general de la relatividad; aumentar el tamaño aparente de objetos muy distantes que, de otro modo, serían inobservables; y medir la masa de las mayores estructuras del universo. Zwicky obvió una cuarta aplicación que, con el tiempo, se revelaría igualmente importante: estudiar la geometría y la evolución del universo a gran escala.

Resulta difícil imaginar cómo alguien podría subestimar más la importancia de un cálculo en física.

SINGULARIDADES IMAGINARIAS

Einstein comprendió enseguida que las ondas gravitacionales («arrugas» en el espaciotiempo) eran una consecuencia de su teoría. Sin embargo, durante un tiempo se desdijo de su predicción original. En la actualidad, la búsqueda de ondas gravitacionales emitidas en colisiones de agujeros negros, estrellas en explosión o durante el período de inflación cósmica promete abrir una nueva ventana a la observación del universo.

Einstein predijo la existencia de ondas gravitacionales en 1916, poco después de concluir la teoría de la relatividad general. Aunque las matemáticas que se esconden tras el fenómeno son complejas, el razonamiento empleado por el físico no lo fue. Según las leyes del electromagnetismo, al agitar una carga eléctrica se genera una perturbación oscilante que se propaga por el espacio y que se manifiesta en forma de onda electromagnética, como la luz. De igual modo, si sacudimos un guijarro en la superficie de un estanque, se producirán ondas en su superficie. Einstein había demostrado que la materia curva el espacio. De modo que, tal y como ocurre en un estanque, una masa en movimiento debería producir perturbaciones en el espacio mismo. Poco después, sin embargo, el investigador comenzó a dudar sobre la realidad física del fenómeno.

Einstein decidió anunciar su cambio de postura en un artículo que envió en 1936 a *Physical Review*, la prestigiosa revista estadounidense donde Zwicky publicaría poco después su nota

Lawrence Krauss es director del Proyecto Orígenes de la Universidad estatal de Arizona y catedrático de física en la Escuela para la Exploración de la Tierra y el Espacio, de la misma universidad. Ha escrito nueve libros; entre ellos, *La física de Star Trek* (Laetoli, 2012) y *Un universo de la nada* (Pasado y Presente, 2013) y ha producido el documental *The unbelievers*, sobre ciencia y razón.



sobre las lentes gravitacionales. La historia de su error y de cómo se percató de él alcanza tintes casi cómicos. Hacía tres años que Einstein había emigrado de Alemania a Estados Unidos, y claramente aún no se había acostumbrado a la manera en que se hacían las cosas al otro lado del Atlántico. Sobre la misma época en que envió su artículo, titulado «¿Existen las ondas gravitacionales?», escribió a su colega Max Born: «*Junto con un joven colaborador he llegado al interesante resultado de que las ondas gravitacionales no existen, si bien se habían considerado ciertas en primera aproximación. Ello demuestra que las ecuaciones de campo no lineales de la relatividad general pueden decirnos más o, más bien, limitarnos más de lo que habíamos creído hasta ahora*».

El artículo que Einstein envió a *Physical Review* ya no existe, pues nunca se publicó. Siguiendo el procedimiento habitual, el editor remitió el manuscrito (elaborado junto con Nathan Rosen, ayudante de Einstein en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton) a un experto anónimo para que lo evaluase. El revisor emitió un informe crítico, el cual fue reenviado a Einstein para que respondiese. El físico quedó atónito al enterarse de que su trabajo había sido objeto de evaluación, ya que dicha práctica no era la norma en las revistas alemanas en las que había publicado hasta entonces.

Einstein respondió con una agria carta al editor: «*El Sr. Rosen y yo le hemos enviado nuestro manuscrito para su publicación y en ningún momento le hemos autorizado a mostrarlo a especialistas antes de que se imprima. No veo razón para contestar a los —en cualquier caso erróneos— comentarios de su experto anónimo. A la vista de este incidente, prefiero publicar mi artículo en otra revista*». Einstein nunca más envió un artículo a *Physical Review*. Y, aparentemente, tampoco leyó el informe del revisor, escrito por el distinguido cosmólogo estadounidense Howard Percy Robertson, donde se explicaba con claridad el error.

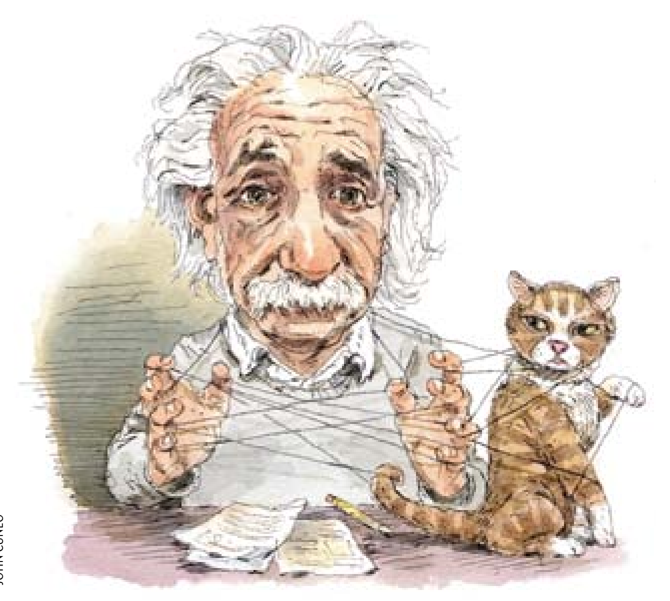
Einstein y Rosen habían intentado encontrar una fórmula para las ondas gravitacionales planas (aquellas con frentes de onda planos y espaciados de manera regular, como las ondas que se producen en la superficie de un estanque muy lejos del lugar en el que cae la piedra). Al hacerlo, encontraron una singularidad: un lugar en el que las cantidades físicas se tornan infinitas. Aquel sinsentido les llevó a concluir que las ondas gravitacionales no podían existir. En realidad, Einstein no había entendido las matemáticas de su propia teoría. La relatividad general nos dice que la naturaleza es independiente de las coordenadas que elijamos para etiquetar los puntos del espacio y el tiempo. Hoy sabemos que numerosos resultados aparentemente extraños de las ecuaciones constituyen meros artificios derivados de una elección inadecuada del sistema de coordenadas.

Por ejemplo, un agujero negro se encuentra rodeado por una superficie, llamada horizonte de sucesos, más allá de la cual nada puede escapar a la atracción gravitatoria. Al escribir las ecuaciones que dan cuenta de la geometría del espacio en las inmediaciones de un agujero negro, varias cantidades, incluidos tiempos y distancias, parecen hacerse infinitas en el horizonte. Pero dichas divergencias no son físicas. Desaparecen si empleamos otras coordenadas, definidas a partir de la manera en que se propagan los rayos de luz. Lo mismo ocurre con las ondas gravitacionales. No existe ningún sistema de coordenadas que permita describirlas sin que aparezcan singularidades, pero estas no son reales. Al usar dos sistemas de coordenadas que se solapan, las singularidades se esfuman.

Aún convencido de su interpretación, Einstein reenvió el manuscrito al *Journal of the Franklin Institute*, pero antes de que apareciese publicado encontró el fallo e informó de ello a los editores. En su versión final, titulada «Sobre las ondas gravitacionales», el trabajo presentaba una solución de las ecuaciones de la relatividad general que hacía uso de un sistema de coordenadas donde las singularidades desaparecían, tal y como había sugerido Robertson en su informe.

¿Cómo llegó Einstein a la conclusión correcta? Según Leopold Infeld, uno de sus ayudantes posteriores, Robertson se puso en contacto con él y amablemente le explicó el error del artículo original y su posible solución. Infeld, a su vez, se lo contó a Einstein. Aparentemente, Robertson nunca reveló que él había sido el evaluador anónimo del artículo enviado a *Physical Review*, y Einstein tampoco volvió a mencionar el informe. Al final, el físico alemán nunca llegó a publicar que las ondas gravitacionales no existían, pero solo gracias a la intervención de un diligente evaluador.

No ocurrió lo mismo con los agujeros negros. Einstein malinterpretó la singularidad ficticia del horizonte de sucesos y dio por sentado que la naturaleza dispondría de algún mecanismo para evitarla. Argumentó que la conservación del momento angular haría que las partículas de un objeto en colapso gravitatorio se estabilizasen en ciertas órbitas, lo que impediría la formación del horizonte. Nunca aceptó los agujeros negros como objetos físicos reales.


JOHN CUNEO

¿UNA BRILLANTE METEDURA DE PATA?

El más célebre de los errores de Einstein fue su modificación de las ecuaciones de la relatividad general para permitir un universo sin expansión. Cuando concluyó su teoría, en 1915, la imagen prevalente en la comunidad científica era que nuestra galaxia se encontraba rodeada por un vacío infinito, estático y eterno. Einstein razonó que, dado que la gravedad es universalmente atractiva —tanto en la relatividad general como en la teoría de Newton—, sería imposible encontrar una solución que describiese un universo estático, ya que la materia siempre acabaría colapsando sobre sí misma.

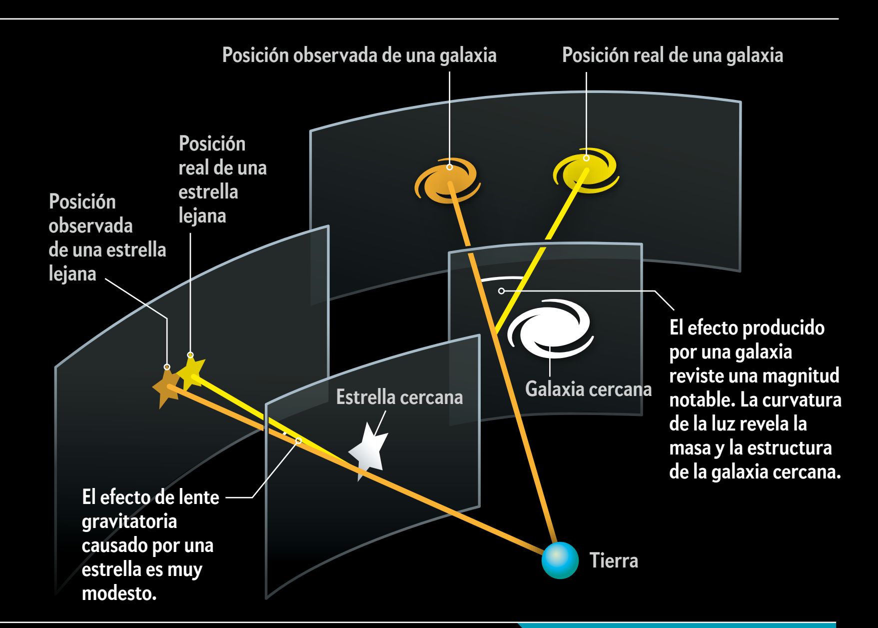
En 1917, en un artículo titulado «Consideraciones cosmológicas de la teoría general de la relatividad», Einstein introdujo un término adicional en sus ecuaciones que aseguraba la existencia de un universo estático. Dicho término dependía de una

Las equivocaciones de un genio

En tres importantes casos, Einstein subestimó el valor de sus hallazgos o bien concluyó que un descubrimiento correcto no era tal. Algunas de las ideas que desechó se han revelado claves para la cosmología moderna. Las lentes gravitatorias se usan hoy para estudiar los cúmulos de galaxias, las ondas gravitacionales ofrecen una ventana a los primeros instantes que sucedieron a la gran explosión, y la constante cosmológica determina la evolución del universo.

Lentes gravitacionales

En su artículo de 1936 que describía las lentes gravitatorias (la deflexión de la luz debida a la gravedad), Einstein concluyó que el fenómeno sería inobservable. Ello se debió a que solo consideró el efecto producido por una estrella, pero no el de una galaxia. Esa razón le llevó incluso a reconsiderar la oportunidad de publicar el resultado. De hecho Einstein ya había calculado el efecto en 1912 usando una versión preliminar de la relatividad general que conducía a una predicción incorrecta. De haberse medido el efecto en aquel entonces, la discrepancia con el cálculo teórico tal vez hubiese mermado la aceptación de la relatividad general.



Ondas gravitacionales

Onda plana que oscila en una dirección constante

Onda cilíndrica cuya dirección de oscilación cambia a lo largo del frente de onda

La teoría general de la relatividad implica la existencia de ondas gravitacionales. Sin embargo, en cierto momento Einstein rechazó su propia predicción. Nunca llegó a publicar aquel desatino gracias a otro de sus errores: considerar el sistema de revisión por pares como un insulto. Tras retirar airadamente su artículo al recibir un informe crítico del evaluador, se percató de su fallo. Había intentado hallar una solución regular que describiese la propagación de ondas que oscilan en una dirección fija. Más tarde, derivó una expresión correcta para ondas cuya dirección de oscilación se mueve a medida que se propagan de forma cilíndrica. Desde entonces, la existencia de ondas gravitacionales ha sido comprobada de manera indirecta.

La constante cosmológica

En 1917 Einstein modificó las ecuaciones de la relatividad general para añadir un término extra, el de la constante cosmológica. Su única razón para ello fue permitir la existencia de soluciones que describiesen un universo estático. Cuando se supo que el cosmos se expandía, Einstein se desdijo y descartó la constante. Lo que nunca supo ver es que la constante cosmológica constituía una generalización muy natural de su teoría. Hoy se cree que dicho término corresponde a la energía del vacío y que podría explicar la actual expansión acelerada del universo.

Ecuaciones de Einstein

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

R y **g** describen la estructura del espaciotiempo

Λ (lambda), la constante cosmológica, da cuenta de una «fuerza repulsiva» que opera en cada punto del espacio

G es la constante de la gravitación universal

c es la velocidad de la luz

T representa la materia y energía presentes en el espaciotiempo

JEN CHRISTIANSEN Y AMANDA MONTAÑEZ

constante, la constante cosmológica, la cual proporcionaría una repulsión en cada punto del espacio cuyo efecto «contendría» la gravedad. Sin embargo, aparte de evitar el colapso, no existía ninguna justificación física para dicho término.

En la década siguiente, las pruebas de que el universo no era estático comenzaron a acumularse. Al principio Einstein se resistió. En 1927, el físico belga y sacerdote católico Georges Lemaître concibió un modelo de un universo en expansión que incluía una especie de gran explosión. Eso ocurrió dos años antes de que Edwin Hubble publicase su histórico artículo en el que documentaba la recesión de las galaxias. Lemaître relató con posterioridad cómo fue amonestado por el Einstein: «Sus cálculos son correctos, pero su física es abominable».

Al final, Einstein tuvo que dar su brazo a torcer. Visitó a Hubble para mirar a través de su telescopio en el Observatorio de Monte Wilson y, en 1933, según se cuenta, alabó la teoría cosmológica de Lemaître diciendo que era «la más bella y satisfactoria explicación de la creación» que había escuchado jamás.

A Einstein no se le escapó que, en un universo en expansión, la constante cosmológica perdía su razón de ser. Ya en 1919 había escrito que dicha constante era «muy perjudicial para la belleza formal de la teoría». Y, en un fragmento muy citado del libro de George Gamow *My world line*, se relata la siguiente anécdota: «Mucho después, cuando estaba discutiendo sobre problemas cosmológicos con Einstein, este mencionó que la introducción del término cosmológico había sido la mayor metedura de pata de su vida».

Desde una perspectiva actual, Einstein se equivocó por completo al pensar que la constante cosmológica era innecesaria, pero su introducción en 1917 fue un error por dos razones. Si hubiera asumido sus convicciones con valentía, habría sabido ver que la ausencia de soluciones estáticas implicaba que la expansión del universo era una predicción de la relatividad general. En ese momento, cuando nadie esperaba un cosmos dinámico a gran escala, Einstein pudo haber predicho la expansión del universo, en lugar de haber tenido que aceptarla después a regañadientes.

Pero la introducción de la constante cosmológica fue también un error desde un punto de vista más fundamental. Aquel término no podía funcionar como Einstein quería, ya que era imposible que produjese el tipo de universo estático que deseaba describir. En parte, dicho error se debió a que, una vez más, Einstein usó en sus cálculos un sistema de coordenadas inadecuado. Pero sus ideas estaban equivocadas también desde un punto de vista físico. Aunque resulta posible compensar la atracción gravitatoria de la materia con la repulsión inducida por la constante cosmológica, una configuración así sería inestable: la mínima perturbación daría lugar a un cosmos en expansión o en colapso. Con o sin la constante cosmológica, el universo debe ser dinámico.

En última instancia, la constante cosmológica ha demostrado ser más duradera que el limitado conocimiento astronómico que la inspiró. Aunque nació como un añadido artificial a las ecuaciones de Einstein, hoy sabemos que, desde el punto de vista de la mecánica cuántica, esta constante corresponde a la energía que puede contener el espacio vacío. De hecho, la teoría cuántica obliga a introducir este término cosmológico. La energía del vacío no es un mero concepto teórico. Una de las observaciones más asombrosas de la física moderna tuvo lugar en 1998, cuando dos grupos constataron que la expansión del universo está acelerándose. El origen de dicha aceleración se debe a algo que guarda grandes semejanzas con la constante cosmológica. En este caso, podemos decir que Einstein cometió un error por partida doble: introdujo la constante cosmológica por la razón equivocada y la eliminó más tarde sin analizar sus implicaciones.

EL ERROR QUE NUNCA ADMITIÓ

Las equivocaciones de Einstein resultaron fértiles desde el punto de vista científico porque hundían sus raíces en ideas provocativas sobre la manera en que funciona la física. Lo mismo cabe decir del que, por regla general, se considera el mayor de sus errores: haber rechazado la mecánica cuántica como teoría fundamental de la naturaleza.

A pesar de que Einstein contribuyó a sentar las bases de la mecánica cuántica con su teoría del efecto fotoeléctrico, por la cual recibiría el premio Nobel, su pensamiento nunca abandonó las premisas de la física clásica. La idea de que la posición de una partícula fuese una cuestión probabilística o de que dos sistemas cuánticos distantes pudiesen mostrar correlaciones instantáneas le parecía un completo absurdo, si bien su visión sobre los dilemas cuánticos estaba más matizada de lo que generalmente se piensa. Los últimos años de su carrera los dedicó a intentar combinar las ecuaciones de la relatividad general y las del electromagnetismo en un único marco clásico, conocido como teoría del campo unificado [*véase* «Sobre la teoría generalizada de la gravitación», por Albert Einstein, *en este mismo número*].

Como parte de aquel trabajo, Einstein quedó fascinado por una idea concebida en 1921 por el gran matemático alemán Theodor Kaluza y ampliada posteriormente por el físico sueco Oskar Klein. Estos sugirieron que, si el universo tuviese cinco dimensiones (el tiempo, las tres dimensiones espaciales a las que estamos acostumbrados y una quinta enrollada sobre sí misma, de modo que resultase inobservable), sería posible formular una descripción unificada del electromagnetismo y la gravedad. Para Einstein, uno de los aspectos más atractivos de dicha teoría residía en su carácter puramente clásico. Klein demostró que, con una quinta dimensión, la aparente cuantización de la carga eléctrica podía entenderse como una consecuencia geométrica debida a que una parte del campo electromagnético quedaba confinada a propagarse en un pequeño círculo.

El esfuerzo de Einstein por construir una teoría unificada nunca llegó a buen puerto. Pero, una vez más, sus ideas fallidas dieron lugar a importantes descubrimientos. Al llamar la atención sobre la quinta dimensión propuesta por Kaluza y Klein, Einstein tal vez contribuyese a inspirar la matemática multidimensional de la moderna teoría de cuerdas, una popular propuesta para incorporar la relatividad general en la mecánica cuántica. Probablemente, Einstein hubiese rechazado la idea de que la relatividad general emerja de la mecánica cuántica, y no al revés. Pero, como hemos visto, Einstein no era infalible.

PARA SABER MÁS

The origin of gravitational lensing: A postscript to Einstein's 1936 *Science* Paper. Jürgen Renn, Tilman Sauer y John Stachel en *Science*, vol. 275, págs. 184-186, enero de 1997.
Einstein versus the *Physical Review*. Daniel Kennefick en *Physics Today*, vol. 59, n.º 9, págs. 43-48, septiembre de 2005.

EN NUESTRO ARCHIVO

El padre renuente de los agujeros negros. J. Bernstein en *IyC*, agosto de 1996.
El universo de Georges Lemaître. Dominique Lambert en *IyC*, abril de 2002.
La constante cosmológica. L. M. Krauss y M. S. Turner en *IyC*, noviembre de 2004.
Errores fecundos. D. Kaiser y A. N. H. Creager en *IyC*, noviembre de 2012.

CATÁLOGO DE PRODUCTOS

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Ejemplares atrasados de *Investigación y Ciencia*: 6,90€



Para efectuar tu pedido:
Teléfono: (34) 934 143 344
A través de nuestra Web:
www.investigacionyciencia.es

PROMOCIONES

5 EJEMPLARES AL PRECIO DE 4

Ahorra un 20 %

5 ejemplares de *MENTE Y CEREBRO* o 5 ejemplares de *TEMAS* por el precio de 4 = 27,60€

SELECCIONES TEMAS

Ahorra más del 25 %

Ponemos a tu disposición grupos de 3 títulos de *TEMAS* seleccionados por materias.

3 ejemplares = 15,00 €

1. ASTRONOMÍA
Planetas, Estrellas y galaxias, Presente y futuro del cosmos
2. BIOLOGÍA
Nueva genética, Virus y bacterias, Los recursos de las plantas
3. COMPUTACION
Máquinas de cómputo, Semiconductores y superconductores, La información
4. FÍSICA
Núcleos atómicos y radiactividad, Fenómenos cuánticos, Fronteras de la física
5. CIENCIAS DE LA TIERRA
Volcanes, La superficie terrestre, Riesgos naturales
6. GRANDES CIENTÍFICOS
Einstein, Newton, Darwin
7. MEDICINA
El corazón, Epidemias, Defensas del organismo
8. MEDIOAMBIENTE
Cambio climático, Biodiversidad, El clima
9. NEUROCIENCIAS
Inteligencia viva, Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente, El cerebro, hoy
11. LUZ Y TÉCNICA
La ciencia de la luz, A través del microscopio, Física y aplicaciones del láser
12. ENERGÍA
Energía y sostenibilidad, El futuro de la energía (I), El futuro de la energía (II)

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN (BSA)

Ahorra más del 60 %

Los 7 títulos indicados de esta colección por 75 €

- Tamaño y vida
- Partículas subatómicas
- Construcción del universo
- La diversidad humana
- El sistema solar
- Matemáticas y formas óptimas
- La célula viva (2 tomos)

Las ofertas son válidas hasta agotar existencias.

TAPAS DE ENCUADERNACIÓN

DE *INVESTIGACIÓN Y CIENCIA*
ANUAL (2 tomos) = 12,00 €
más gastos de envío = 5,00 €



Si las tapas solicitadas, de años anteriores, se encontrasen agotadas remitiríamos, en su lugar, otras sin la impresión del año.

BIBLIOTECA SCIENTIFIC AMERICAN

Edición en rústica

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
012-3	El sistema solar	12 €
016-6	Tamaño y vida	14 €
025-5	La célula viva	32 €
038-7	Matemática y formas óptimas	21 €

Edición en tela

N.º ISBN	TITULO	P.V.P.
004-2	La diversidad humana	24 €
013-1	El sistema solar	24 €
015-8	Partículas subatómicas	24 €
017-4	Tamaño y vida	24 €
027-1	La célula viva (2 tomos)	48 €
031-X	Construcción del universo	24 €
039-5	Matemática y formas óptimas	24 €
046-8	Planeta azul, planeta verde	24 €
054-9	El legado de Einstein	24 €



GASTOS DE ENVÍO

(Añadir al importe del pedido)

	España	Otros países
1er ejemplar	2,00 €	4,00 €
Por cada ejemplar adicional	1,00 €	2,00 €

MENTE y CEREBRO

Precio por ejemplar: 6,90 €

MyC 1: Conciencia y libre albedrío
MyC 2: Inteligencia y creatividad
MyC 3: Placer y amor
MyC 4: Esquizofrenia
MyC 5: Pensamiento y lenguaje
MyC 6: Origen del dolor
MyC 7: Varón o mujer: cuestión de simetría
MyC 8: Paradoja del samaritano
MyC 9: Niños hiperactivos
MyC 10: El efecto placebo
MyC 11: Creatividad
MyC 12: Neurología de la religión
MyC 13: Emociones musicales
MyC 14: Memoria autobiográfica
MyC 15: Aprendizaje con medios virtuales
MyC 16: Inteligencia emocional
MyC 17: Cuidados paliativos
MyC 18: Freud
MyC 19: Lenguaje corporal
MyC 20: Aprender a hablar
MyC 21: Pubertad
MyC 22: Las raíces de la violencia
MyC 23: El descubrimiento del otro
MyC 24: Psicología e inmigración
MyC 25: Pensamiento mágico
MyC 26: El cerebro adolescente
MyC 27: Psicograma del terror
MyC 28: Sibaritismo inteligente
MyC 29: Cerebro senescente
MyC 30: Toma de decisiones
MyC 31: Psicología de la gestación
MyC 32: Neuroética
MyC 33: Inapetencia sexual
MyC 34: Las emociones *
MyC 35: La verdad sobre la mentira
MyC 36: Psicología de la risa
MyC 37: Alucinaciones
MyC 38: Neuroeconomía
MyC 39: Psicología del éxito
MyC 40: El poder de la cultura
MyC 41: Dormir para aprender
MyC 42: Marcapasos cerebrales
MyC 43: Deconstrucción de la memoria *
MyC 44: Luces y sombras de la neurodidáctica
MyC 45: Biología de la religión
MyC 46: ¡A jugar!
MyC 47: Neurobiología de la lectura
MyC 48: Redes sociales
MyC 49: Presiones extremas
MyC 50: Trabajo y felicidad
MyC 51: La percepción del tiempo
MyC 52: Claves de la motivación
MyC 53: Neuropsicología urbana
MyC 54: Naturaleza y psique
MyC 55: Neuropsicología del yo
MyC 56: Psiquiatría personalizada
MyC 57: Psicobiología de la obesidad
MyC 58: El poder del bebé
MyC 59: Las huellas del estrés
MyC 60: Evolución del pensamiento
MyC 61: TDAH
MyC 62: El legado de Freud
MyC 63: ¿Qué determina la inteligencia?
MyC 64: Superstición
MyC 65: Competición por el cerebro
MyC 66: Estudiar mejor
MyC 67: Hombre y mujer
MyC 68: La hipnosis clínica
MyC 69: Cartografía cerebral
MyC 70: Pensamiento creativo
MyC 71: El cerebro bilingüe
MyC 72: Musicoterapia
MyC 73: La neurociencia del futuro
MyC 74: El poder de las marcas

(*) Disponible solo en formato digital



TEMAS de INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

Precio por ejemplar: 6,90 €

T-1: Grandes matemáticos *
T-2: El mundo de los insectos *
T-3: Construcción de un ser vivo *
T-4: Máquinas de cómputo
T-5: El lenguaje humano *
T-6: La ciencia de la luz
T-7: La vida de las estrellas
T-8: Volcanes
T-9: Núcleos atómicos y radiactividad
T-10: Misterios de la física cuántica *
T-11: Biología del envejecimiento *
T-12: La atmósfera
T-13: Presente y futuro de los transportes
T-14: Los recursos de las plantas
T-15: Sistemas solares
T-16: Calor y movimiento
T-17: Inteligencia viva
T-18: Epidemias
T-19: Los orígenes de la humanidad *
T-20: La superficie terrestre
T-21: Acústica musical
T-22: Trastornos mentales
T-23: Ideas del infinito
T-24: Agua
T-25: Las defensas del organismo
T-26: El clima
T-27: El color
T-28: La consciencia *
T-29: A través del microscopio
T-30: Dinosaurios
T-31: Fenómenos cuánticos
T-32: La conducta de los primates
T-33: Presente y futuro del cosmos
T-34: Semiconductores y superconductores
T-35: Biodiversidad
T-36: La información
T-37: Civilizaciones antiguas
T-38: Nueva genética
T-39: Los cinco sentidos
T-40: Einstein
T-41: Ciencia medieval
T-42: El corazón
T-43: Fronteras de la física
T-44: Evolución humana
T-45: Cambio climático
T-46: Memoria y aprendizaje
T-47: Estrellas y galaxias
T-48: Virus y bacterias
T-49: Desarrollo del cerebro, desarrollo de la mente
T-50: Newton
T-51: El tiempo *
T-52: El origen de la vida *
T-53: Planetas
T-54: Darwin
T-55: Riesgos naturales
T-56: Instinto sexual
T-57: El cerebro, hoy
T-58: Galileo y su legado
T-59: ¿Qué es un gen?
T-60: Física y aplicaciones del láser
T-61: Conservación de la biodiversidad
T-62: Alzheimer
T-63: Universo cuántico *
T-64: Lavoisier, la revolución química
T-65: Biología marina
T-66: La dieta humana: biología y cultura
T-67: Energía y sostenibilidad
T-68: La ciencia después de Alan Turing
T-69: La ciencia de la longevidad
T-70: Orígenes de la mente humana
T-71: Retos de la agricultura
T-72: Origen y evolución del universo
T-73: El sida
T-74: Taller y laboratorio
T-75: El futuro de la energía (I)
T-76: El futuro de la energía (II)
T-77: El universo matemágico de Martin Gardner
T-78: Inteligencia animal
T-79: Comprender el cáncer
T-80: Grandes ideas de la física
T-81: Epigenética

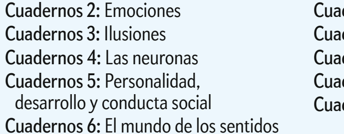
(*) Disponible solo en formato digital

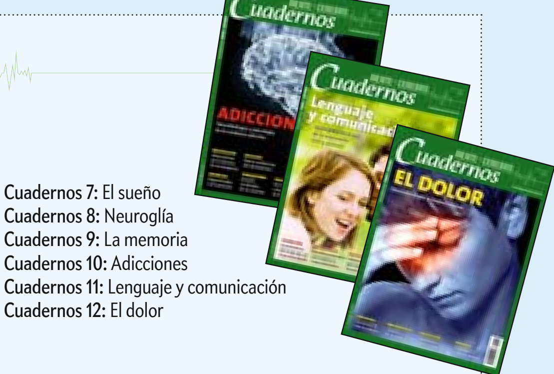




Precio por ejemplar: 6,90 €

Cuadernos 1: El cerebro
Cuadernos 2: Emociones
Cuadernos 3: Ilusiones
Cuadernos 4: Las neuronas
Cuadernos 5: Personalidad, desarrollo y conducta social
Cuadernos 6: El mundo de los sentidos
Cuadernos 7: El sueño
Cuadernos 8: Neuroglía
Cuadernos 9: La memoria
Cuadernos 10: Adicciones
Cuadernos 11: Lenguaje y comunicación
Cuadernos 12: El dolor





por Jorge Mataix Solera y Xavier Úbeda

La epidermis terrestre quemada

Conocer la fragilidad del suelo tras un incendio resulta fundamental para poder contribuir a su recuperación

El fuego forma parte del ciclo natural de la mayoría de los ecosistemas. Sin embargo, los humanos hemos modificado los montes y sus usos y, con ello, hemos alterado el régimen natural de los incendios, esto es, la frecuencia y la intensidad con las que se producen [*véase* «Fuego y evolución en el Mediterráneo», por Juli G. Pausas; Investigación y Ciencia, agosto de 2010].

Los científicos llevamos décadas estudiando las alteraciones que provocan los incendios en el suelo y sabemos que son muchos los factores que influyen en su recuperación, como el tipo de suelo quemado, las temperaturas alcanzadas en la superficie o las condiciones meteorológicas posteriores a la perturbación.

Hoy en día conocemos el modo en que las características físicas, químicas y microbiológicas del suelo se ven afectadas por el fuego y disponemos de indicadores que nos informan sobre su salud y grado de recuperación. Una propiedad de especial relevancia en los ambientes mediterráneos secos es la repelencia del suelo al agua. Esta se define como la afinidad que presenta el suelo por el agua y depende de la presencia de compuestos orgánicos hidrofóbicos, los cuales suelen aumentar por el efecto de las altas temperaturas. La estabilidad de los agregados (grupos de partículas minerales y orgánicas), el contenido de materia orgánica o la biomasa microbiana, la glomalina (una sustancia cementadora producida por hongos micorrícicos), constituyen otros parámetros de enorme interés para valorar el estado del suelo.

Como si de un enfermo se tratase, debemos hacer un diagnóstico para decidir si es necesario ayudar al suelo a recuperarse o es mejor dejarlo descansar hasta que sus heridas cicatricen. Pero desde que se produce el incendio hasta que empieza a regenerarse la cubierta vegetal, hay un período de tiempo en el que el suelo es un sistema frágil y propenso a la degradación, por lo que deberemos prestarle especial atención e intentar evitar ciertas actuaciones (como la retirada de troncos quemados) que podrían resultar incluso más dañinas que el propio fuego.

La mayor parte de las zonas incendiadas no requerirán una actuación posterior, pero otras, especialmente las afectadas por incendios de alta intensidad, sí necesitarán nuestra ayuda. Y la primera mirada deberemos dirigirla al suelo, que tendremos que proteger si no queremos que el ecosistema se vea afectado en su conjunto. Nuestro grupo centra precisamente sus investigaciones en los efectos del fuego en el suelo y las repercusiones de diferentes medidas de gestión después de la perturbación.

—Jorge Mataix-Solera
Dpto. de agroquímica y medioambiente
Universidad Miguel Hernández
—Xavier Úbeda
Dpto. de geografía física y análisis geográfico regional
Universidad de Barcelona



LA VULNERABILIDAD DEL SUELO a la erosión y la degradación aumenta tras un incendio. En la imagen, pinar de Bocairente (Valencia) quemado en 2010.

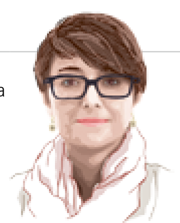


LA GERMINACIÓN DE LAS SEMILLAS liberadas por los pinos quemados comienza siete meses después de un incendio de intensidad moderada en Finestrat (Alicante). En muchos casos, esperar a que se regenere por sí sola la cubierta vegetal representará la mejor opción para promover la recuperación del suelo.

LA REPELENCIA DEL SUELO AL AGUA después de un incendio aumenta, lo que da lugar a una menor infiltración del agua y a una mayor escorrentía superficial. Esta muestra de suelo, quemada a 250 °C en el laboratorio, presenta una repelencia extrema, ya que las gotas de agua tardan en infiltrarse más de una hora.

LA EXTRACCIÓN DE LA MADERA QUEMADA mediante el uso de maquinaria pesada y el arrastre de troncos supuso una medida agresiva en este suelo de la sierra de Mariola (Alicante), muy vulnerable a la degradación. Un episodio de lluvia de 50 milímetros intensificó los procesos erosivos ya iniciados por el tratamiento.

por Ana Cuevas



Ana Cuevas es profesora de filosofía de la tecnología en la Universidad de Salamanca.

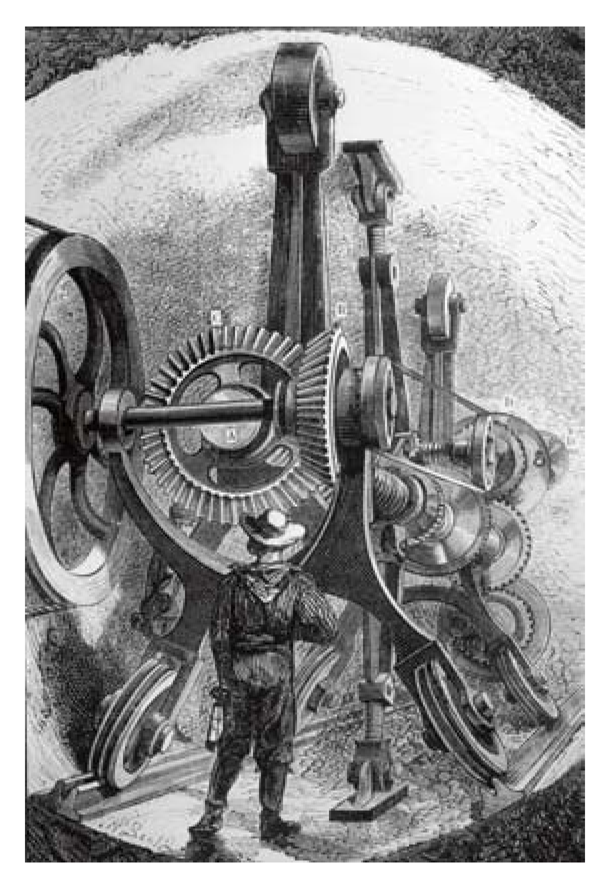
La extraña relación entre filosofía y tecnología

Tras un largo y lamentable olvido, los pensadores comienzan a centrar su atención en las dimensiones filosóficas de la tecnología

La filosofía occidental ha tomado desde antiguo como objetos de reflexión los más diversos fenómenos: la naturaleza, el conocimiento, el arte, la moral, la política, Dios, la educación, el amor o la guerra. Sin embargo, y a pesar de su ubicuidad, la técnica no ha merecido atención más que en tiempos recientes. Con excepciones notables como el análisis que Aristóteles hace sobre la *tekné* como forma de conocimiento especial, la mayor parte de los filósofos tradicionales apenas mencionan nuestra capacidad excepcional de crear esa «sobrenaturaleza» que es la técnica. Precisamente fue Ortega y Gasset, uno de los primeros filósofos profesionales que trató en particular sobre el tema, quien la consideró como una imposición material humana sobre el mundo de lo natural para hacerlo más habitable: nuestra forma de adaptar el medio al sujeto.

Las explicaciones de ese olvido son muy diversas y posiblemente tengan mucho que ver con un cierto prejuicio con respecto a las tareas manuales. Pero lo más interesante de la filosofía de la tecnología quizá no sea su falta de historia, sino las consecuencias de su juventud. Como disciplina en pleno desarrollo, muchos de los asuntos fundamentales están aún en discusión, sin que se hayan fijado posturas firmes. Además, es un área que puede resultar atractiva para los que se inician en la investigación filosófica por todo lo que queda aún por hacer.

A continuación quisiera llevar a cabo un pequeño esbozo de los problemas que se están abordando en la reflexión filosófica sobre este asunto, que, por cotidiano e influyente, nos resulta insoslayable. Para hacerlo me ayudaré de una clasificación habitual en filosofía. Así, podemos tratar cuestiones de tres tipos: ontológicas (¿qué diferencia el objeto que estudiamos, en tanto su composición o estructura, de otros?), epistemológicas (¿el conocimiento que se requiere para el desarrollo y uso de la tecnología es peculiar o diferente de otras formas de conocimiento?) y morales (¿cuáles son las repercusiones de las nuevas técnicas sobre la vida presente y futura de los humanos?). Asimismo, la filosofía ha entrado en colaboración con disciplinas como la sociología, la historia o la economía, naturalizándose, empleando conocimientos y métodos procedentes de ellas. En conjunto, este campo engloba los «estudios sociales de la técnica», que nacieron como hermanos de los «estudios sociales de la ciencia».



ISTOCKPHOTO/HULTONARCHIVE

Las cuestiones ontológicas son varias. La técnica se materializa en objetos, pero ¿qué hace que un objeto pueda ser considerado un artefacto técnico? Esta pregunta, a la que subyace otra más general —la diferencia entre lo natural y lo artificial— reside en el corazón de cualquier reflexión sobre la técnica. Podría parecer que aquellos objetos que los humanos creamos con el propósito (intencionalmente, en jerga filosófica) de que desarrollen una función serían buenos candidatos para ser artefactos técnicos y, además, artificiales.

Sin embargo, esa definición no es del todo precisa. Por un lado, deja fuera objetos que tenderíamos a pensar que también pertenecen a la categoría de artefactos. Imaginemos que estamos montando nuestra tienda de campaña. De repente nos damos cuenta de que hemos olvidado el martillo en casa. Solución: escogemos una piedra de tamaño, peso y dureza adecuados, que cumpla la misma función que el martillo. De hecho, nos gusta tanto, que la guardamos en la bolsa con la tienda para futuros usos. ¿En qué momento pasa de ser una mera piedra a un pseudomartillo?

Lo mismo sucede con ciertos objetos artificiales, creados por nosotros para que desarrollen una determinada función, que no son exactamente artefactos técnicos. Pensemos en el dinero, un artefacto más bien social (podemos emplear cualquier cosa como di-

nero, lo único que hace falta es que una institución social apropiada lo sancione como tal). Y también estaríamos dejando fuera los objetos que fabrican algunos animales con propósitos prácticos, como las conocidas ramitas que utilizan los chimpancés para cazar hormigas.

Por otro lado, según la definición propuesta, algunas cosas que no pensaríamos que son artefactos técnicos pasan a serlo: las vacas o los perros, especies resultado de un proceso de selección artificial (humano) para que desarrollen ciertas funciones (biológicas) para nuestro beneficio, serían artefactos. La versión más moderna —y quizá menos chocante— de estos bioartefactos serían los organismos transgénicos, que tantas reacciones de temor y rechazo producen.

¿Y qué decir de los difusos límites entre algunos objetos artísticos y los artefactos técnicos? Si han visitado el museo Guggenheim en Bilbao no habrán podido escapar de la sensación de estar contemplando desde fuera una enorme escultura, perfectamente funcional por dentro.

Saber qué es un artefacto técnico continúa siendo, pues, un problema para la filosofía.

En cuanto a las cuestiones epistemológicas, las relacionadas con el conocimiento, hay un lugar común con el que tienen que vérselas los filósofos. Nos referimos a la idea generalizada de que la tecnología moderna es resultado del desarrollo científico o, como decía Mario Bunge, que «la tecnología es ciencia aplicada». De manera que, aunque no todo el conocimiento requerido para desarrollar tecnología es de tipo científico —existen otras formas de conocimiento, de carácter más práctico, sobre cómo hacer cosas, que se considerarían propiamente técnicas—, sin los desarrollos previos en ciencia básica no habría tecnología.

Sin embargo, como pasaba con la definición de artefacto, parece que esos límites claros dejan de serlo cuando realizamos una indagación un poco más profunda. El conocimiento científico tradicional se caracterizaría por su pretensión de resolver cuestiones generales y avanzar en nuestra comprensión del mundo, más allá de lo aparente. Pero muchos conocimientos científicos no tienen, ni pretenden tener, aplicabilidad práctica; así como numerosos desarrollos técnicos no han requerido de complejos descubrimientos científicos.

Para complicar aún más las cosas, durante los últimos decenios han surgido áreas difícilmente clasificables como científicas o como tecnológicas. Tal es el caso de la biotecnología, la nanotecnología o la ingeniería aeroespacial. Asimismo, cabe preguntarse cuánto conocimiento tecnológico hace falta para crear una infraestructura como el LHC. A pesar de que cunda entre los científicos fundamentales un cierto desdén hacia los tecnólogos, sin ellos la ciencia actual habría tenido serios problemas para poner a prueba sus hipótesis.

Los asuntos morales han merecido una mayor atención desde la filosofía tradicional. Los artefactos y sistemas técnicos conforman nuestra existencia desde el momento en que nacemos hasta el instante en que morimos, e incluso más allá de estos límites (se pueden escoger embriones y trasplantar órganos). Esta intromisión puede llegar a convertirse para algunos filósofos en un serio problema. Nos fusionamos de tal manera con los objetos técnicos que ni siquiera nos damos cuenta de dónde termina nuestro organismo y comienza el artefacto, o como expresaba Heidegger, «la esencia de la técnica penetra nuestra existencia de una manera que apenas sospechamos».

Cualquiera que sepa andar en bicicleta sabe a qué me refiero. Y este es un artefacto bastante inocuo, incluso podríamos decir que es un buen aparato. ¿Por qué consideramos que es «bueno»? Una bicicleta no contamina, nos ayuda a convertir nuestra energía en movimiento de una manera eficiente (el valor tecnológico por excelencia), es duradera y además no hacen falta grandes conocimientos técnicos para poder arreglarla —pruebe a hacer eso con su automóvil.

También hay otros objetos que ni siquiera tenemos que manipular pero que median constantemente entre nosotros y nuestro entorno, modificando nuestras relaciones con el medio y con otros humanos. Las nuevas tecnologías de la información y la comunicación generan grandes posibilidades, pero también graves riesgos con respecto a los límites de nuestra intimidad. Los problemas ambientales, uno de los primeros riesgos que se vincularon con el desarrollo incontrolado de ciertas tecnologías, cambiaron nuestra perspectiva acerca de los beneficios sin fin que supuestamente reportaba el progreso tecnológico. (La bióloga Rachel Carson nos hizo ver que las primaveras cada vez son más silenciosas.)

Y acerca de esos otros problemas que nos indican las ciencias sociales, hay una cierta preocupación por el devenir de nuestras democracias, convertidas cada vez más en tecnocracias, sistemas políticos en los que ciertos expertos en ciencia y tecnología son los que toman las decisiones más transcendentes sobre nuestras sociedades. Lo que también se interpreta desde una cierta autonomía de la tecnología (analizada por Jacques Ellul), una visión de que esta sigue sus propias leyes de desarrollo con independencia de lo que los humanos queramos o de cualquier otro factor externo a ella. Un desarrollo para el que no todos estamos igualmente preparados y que ahonda en la brecha entre grupos sociales, entre culturas y entre países. Aunque también cabe ver las nuevas tecnologías de la información como una gran oportunidad: para el acceso a la educación de personas a las que antes les resultaba casi imposible o para mejorar la participación ciudadana en el devenir histórico. Piénsese si no en los cursos en línea masivos y abiertos (MOOC) que muchas universidades están abriendo libremente al mundo, o en el papel de las redes sociales en la Primavera Árabe.

Resulta un tanto increíble que esos problemas, muchos de ellos producto de la modernidad pero otros permanentes en la historia de la humanidad, no fuesen tenidos en cuenta por los filósofos prácticamente hasta el siglo XX. Tenemos, pues, por delante retos magníficos. La reflexión filosófica sobre la tecnología tiene que servir para orientarnos en un mundo cada vez más tecnológicamente complejo.

PARA SABER MÁS

Philosophy and technology. Roger Fellows. Cambridge University Press, 1995.

Tecnología, un enfoque filosófico. Y otros ensayos. Miguel A. Quintanilla. Fondo de Cultura Económico, Argentina, 2005.

Teaching about technology. An introduction to the philosophy of technology for non-philosophers. Marc J. De Vries. Springer Verlag, Berlín, 2005.

Philosophy of technology. An introduction. Val Dusek. Blackwell Publishing, 2006.

A philosophy of technology - From technical artefacts to sociotechnical systems. Pieter Vermaas et al. en *Synthesis Lectures on Engineers, Technology, and Society*, vol. 6, n.º 1, págs. 1-134, Morgan & Claypool Publishers, 2011.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los valores de las ciencias. Javier Echeverría en *IyC*, mayo de 2014.

por David Teira

David Teira es profesor de filosofía de la ciencia en la Universidad Nacional de Educación a Distancia, donde investiga los sesgos que aparecen en experimentos con humanos en las ciencias biomédicas y sociales.



Experimentos evanescentes

Una grave crisis de replicabilidad sacude las ciencias sociales y biomédicas

Decimos que un experimento es replicable si es posible repetirlo en condiciones idénticas (mismo diseño, mismo protocolo, mismos instrumentos...) y obtener el mismo resultado una y otra vez. Decimos que es reproducible si podemos obtener ese resultado cambiando alguna de las condiciones originales. Replicabilidad y reproducibilidad son características que asociamos a la objetividad de la ciencia. El resultado de un estudio no puede depender de los intereses o destrezas del experimentador; por tanto, repetirlo debe estar al alcance de cualquier investigador competente.

Sin embargo, la replicabilidad suele brillar por su ausencia en el panorama científico actual, lo que ha provocado más de un escándalo. A veces se trata de un simple fraude: Diederik Stapel, exitoso psicólogo de la Universidad de Tilburg, se vio obligado a admitir en 2011 que se inventaba buena parte de sus datos. Pero en muchas otras ocasiones las causas son más complejas, pues no responden a la ambición de un científico corrupto, sino a la manera de funcionar de toda una disciplina experimental.

Si las replicaciones son tan cruciales para la credibilidad científica, ¿cómo es que se publican tan pocas? En 2012, Matthew C. Makel, de la Universidad Duke, y sus colaboradores publicaron en *Perspectives on Psychological Science* un trabajo en el que estimaban que, en las dos décadas anteriores, apenas un 1 por ciento de los artículos publicados en las 100 principales revistas de psicología correspondían a replicaciones.



Cuando los intereses científicos se mezclan con los financieros, la situación se complica todavía más. Desde el año 2000, los autores de ensayos clínicos para comprobar la eficacia de medicamentos están obligados a depositar en un registro público su protocolo experimental, resultados, etcétera. Así, con independencia de si finalmente se publican, podemos seguir los datos acumulados sobre un tratamiento. En un estudio reciente publicado en PLoS ONE, Robert Kaplan, de la Agencia estadounidense para la Investigación y Calidad de la Atención Sanitaria, y Veronica Irwin, de la Universidad estatal de Oregón, han comparado el resultado de los ensayos de tratamientos cardiovasculares antes y después del año 2000: mientras que antes de 2000 se publicaban un 57 por ciento de resultados positivos, una vez que fue obligado registrar los ensayos la cifra descendió al 8 por ciento.

Conforme se van sucediendo escándalos sobre experimentos irreplicables, nos vemos obligados a preguntarnos qué está pasando en la ciencia y dónde queda nuestra esperanza de objetividad experimental. Algunos apuestan por explicaciones institucionales. La ciencia es hoy una institución muy competitiva donde el ganador se lo lleva todo, sean puestos de trabajo o presupuestos de investigación. Obtener un resultado negativo no ayuda en esa guerra, pues los editores de revistas no están interesados en publicarlos. Además, ¿quién está interesado en financiar la repetición de un experimento «que ya se ha hecho»?

Otros apuntan a un problema de alfabetización estadística. En ocasiones, los investigadores persiguen demostrar la falsedad de una hipótesis comúnmente admitida. Para ello diseñan un experimento en el que, si esa hipótesis es verdadera, obtendrán su confirmación en un 95 por ciento de las replicaciones y un resultado refutatorio solo en un 5 por ciento. Cuando observan uno de estos casos «negativos», muchos autores automáticamente concluyen que la hipótesis es falsa. Pero esta no es la única interpretación estadística admisible: quizá simplemente hayan observado un caso raro, y si repiten el experimento verán muchas más confirmaciones que refutaciones. Como decía el padre del diseño estadístico de experimentos, Ronald Fisher, necesitamos repetir el experimento muchas veces antes de poder decidir si una hipótesis es falsa. Pero la mayor parte de las veces, ello no sucede; de ahí la malinterpretación de $p \leq 0{,}05$ por parte de autores y editores [*véase* «El valor resbaladizo de *p*», por Regina Nuzzo; Investigación y Ciencia, diciembre de 2014].

Se deba a factores institucionales o estadísticos, la crisis de replicabilidad es, en teoría, fácil de solucionar: reformemos las instituciones científicas para favorecer la replicación de experimentos, mejoremos la educación estadística de los investigadores y controlemos mejor su actividad para evitar el fraude y las malas prácticas (documentadas ampliamente en blogs como *Retraction Watch*). Obviamente, la dificultad estriba en ponerle el cascabel al gato: ¿preferimos invertir en asegurar con replicaciones nuestros resultados científicos, o seguir premiando al innovador y tolerar un mayor nivel de fraude a cambio de algún hallazgo genial?

Al fin y al cabo, la replicación no lo es todo. En 2009, Leanne Roberts, de la Oficina Diocesana de Southwark (Londres), publicó una revisión para la Colaboración Cochrane sobre experimentos que se habían propuesto ver si aquellos pacientes por los que se rezaba se curaban más que otros por los que no había plegarias. Los resultados eran ambiguos, pero ¿admitirían ustedes la efectividad terapéutica del rezo tan solo por disponer de datos experimentales replicables al respecto? Nos queda mucho por discutir sobre qué experimentos queremos y cuánto estamos dispuestos a pagar, como contribuyentes o mecenas, para llevarlos a cabo.



LOS EXPERIMENTOS MENTALES DE EINSTEIN

FÍSICA TEÓRICA

¿Cuán importante ha sido para el avance de la fisica el uso de la imaginación?

Sabine Hossenfelder

Gedankenexperiment, combinación de palabras que en alemán significa «experimento mental», es el famoso nombre que Albert Einstein les daba a las situaciones imaginarias que le sirvieron para idear sus mayores descubrimientos físicos. De adolescente fantaseaba acerca de perseguir haces de luz; él mismo diría que fue el punto de partida de la idea central de la relatividad especial. La relatividad general, su monumental teoría de la gravitación, se originó en sus reflexiones sobre ascensores que subían o caían. En ambos casos, Einstein elaboró nuevas teorías sobre la naturaleza valiéndose de la imaginación para ir más allá de las limitaciones del laboratorio.

Einstein no fue ni el primero ni el último teórico en proceder así, pero sus destacados logros fueron fundamentales a la hora de establecer el *Gedankenexperiment* como una pieza básica de la física teórica moderna. Hoy en día, los teóricos usan los experimentos mentales de manera habitual, sea para elaborar nuevas teorías, sea para localizar inconsistencias o efectos inusuales en las ya existentes.

Pero esta aceptación de los experimentos mentales plantea algunas cuestiones incómodas. En la búsqueda de una teoría de gran unificación que case el mundo a pequeña escala de la mecánica cuántica con la descripción relativista de Einstein del universo a gran escala, las ideas más seguidas hoy carecen del apoyo observacional de los experimentos reales. ¿Puede el pensamiento por sí solo sustentarlas? ¿Hasta qué punto podemos confiar en la deducción lógica? ¿Dónde está la frontera entre la intuición científica y la fantasía? El legado de Einstein no ofrece respuestas seguras. Por un lado, su confianza en el poder del pensamiento obtuvo, sin duda, un éxito espectacular. Por otro, muchos de sus experimentos mentales más conocidos estaban basados en datos de experimentos reales, como el clásico de Michelson y Morley que estableció que la velocidad de la luz era constante. Es más, la fijación de Einstein con aquello que podía medirse en ocasiones lo cegaba y le impedía acceder a capas de la realidad más profundas, aunque incluso los errores que cometió en los experimentos mentales han contribuido a posteriores avances.

Aquí revisaremos algunos de los experimentos mentales de Einstein más emblemáticos. Se destacará cómo tuvieron éxito, dónde fracasaron y su importancia permanente para algunas cuestiones actuales en las fronteras de la física teórica.

EL ASCENSOR SIN VENTANAS

En sus experimentos mentales, la genialidad de Einstein radicaba en comprender qué aspectos de la experiencia eran esenciales y cuáles podían descartarse. Consideremos el más famoso: el experimento mental del ascensor. Lo empezó a concebir en 1907. Einstein argumentaba que dentro de un ascensor sin ventanas una persona no podría distinguir si el ascensor estaba en reposo en un campo gravitatorio o si, por el contrario, estaba siendo izado con aceleración constante en un espacio libre de gravedad. Conjeturó entonces que las leyes de la física tenían que ser idén-

SAM FALCONER

ticas en ambas situaciones. De acuerdo con este «principio de equivalencia», los efectos de la gravedad son, de manera local (en el ascensor), los mismos que los de la aceleración en ausencia de gravedad. Transformado en ecuaciones matemáticas, este principio se convirtió en la base de la relatividad general. En otras palabras, el experimento mental del ascensor impulsó a Einstein a realizar el audaz salto intelectual que, en última instancia, lo llevó a su mayor logro, la descripción geométrica de la gravedad.

ACCIÓN FANTASMAL

Más adelante en su carrera, Einstein luchó duramente contra los supuestos básicos de la mecánica cuántica, en particular contra el principio de incertidumbre, que dicta que cuanto más se sabe sobre un aspecto de una partícula fundamental, como su posición, menos se puede saber sobre otro aspecto complementario de esa misma partícula, como su momento (y viceversa). Einstein pensaba que el principio de incertidumbre era una señal de que la teoría cuántica tenía deficiencias profundas.

En las discusiones que mantuvo durante años con el teórico cuántico danés Niels Bohr, Einstein concibió toda una serie de experimentos mentales con la intención de demostrar que era posible violar el principio de incertidumbre, pero Bohr los desmontó todos. Ello le sirvió a Bohr para reforzar su convicción de que la incertidumbre cuántica era una característica fundamental de la naturaleza. Si ni siquiera el gran Einstein podía imaginar un modo de medir con precisión tanto la posición como el momento (o la energía y el tiempo) de una partícula, ciertamente tenía que existir algo como el principio de incertidumbre.

En 1935, junto con sus colegas Boris Podolsky y Nathan Rosen, Einstein publicó la que habría de ser su más potente crítica del principio de incertidumbre. Quizá porque fue Podolsky, no Einstein, el que redactó el texto del artículo, el experimento mental de Einstein, Podolsky y Rosen (EPR) se presentó no como una situación fácil de imaginar, con cajas, relojes y haces de luz, sino como una serie de abstractas ecuaciones que describían dos sistemas cuánticos generalizados.

La versión más sencilla del experimento EPR estudia el paradójico comportamiento de partículas «entrelazadas», pares de partículas que comparten un estado cuántico común. Se desarrolla de la manera siguiente. Imaginemos una partícula inestable con espín cero que se descompone en dos partículas hijas, disparadas en direcciones opuestas. (El espín es una medida del momento angular de una partícula, pero, en contra del sentido común, no tiene nada que ver con la velocidad de rotación de esta.) Las leyes de conservación dictan que los espines de las partículas hijas tienen que sumar cero; una partícula, por tanto, podría tener un espín apuntando «hacia arriba» y la otra «hacia abajo». Las leyes de la mecánica cuántica nos dicen que, en ausencia de medida, ninguna de las partículas tiene un espín definido; cada una está en una superposición de los dos estados posibles. Entonces, si medimos una de las dos partículas entrelazadas, el estado de la otra cambiará de forma instantánea, incluso si las partículas están separadas por grandes distancias.

Einstein pensaba que esta «acción fantasmal a distancia» no tenía sentido. Su propia teoría de la relatividad especial mantenía que nada puede viajar más rápido que la luz, así que no había manera de que dos partículas se comunicasen entre ellas de forma instantánea desde extremos opuestos del universo. Sugirió entonces que los resultados de la medida tenían que estar determinados de forma previa por «variables ocultas» que la mecánica cuántica no explicaba. Siguieron décadas de discusiones hasta 1964, año en que el físico John Stewart Bell desarrolló un teorema que cuantificaba de forma exacta cómo la información compartida por partículas entrelazadas difería de la información que, según dictaba Einstein, tenía que proceder de variables ocultas.

Desde los años setenta, los experimentos de laboratorio con sistemas cuánticos entrelazados han confirmado una y otra vez que Einstein se equivocaba, que las partículas cuánticas sí comparten información común que no se puede explicar con variables ocultas. La fantasmal acción a distancia es real, pero los experimentos muestran que no puede utilizarse para transmitir información a mayor velocidad que la de la luz, con lo que es perfectamente compatible con la relatividad especial de Einstein. Esta verdad, contraria al sentido común, se mantiene como uno de los enigmas más misteriosos de toda la física, y la oposición terca y equivocada de Einstein resultó crucial para confirmarla.

ALICIA Y BENITO

Hoy en día, algunos de los experimentos mentales más significativos en física exploran cómo reconciliar el universo de Einstein, relativista y que funciona como un reloj, con la vaguedad e incertidumbre inherentes a las partículas cuánticas.

Consideremos, por ejemplo, la ampliamente discutida paradoja de la información de los agujeros negros. Si combinamos



Sabine Hossenfelder es profesora en el Nordita, el Instituto Nórdico de Física Teórica, en Estocolmo. Trabaja en gravedad cuántica y física más allá del modelo estándar. Se pueden encontrar más escritos suyos en su blog, *Backreaction* (backreaction.blogspot.com).

EN SÍNTESIS

Una de las perdurables contribuciones de Einstein a la física fue su uso de los *Gedankenexperimente*, o experimentos mentales.

Su intuición sobre los ascensores en caída libre, por ejemplo, le llevó a su mayor logro, la teoría de la relatividad general.

Hoy en día, algunas de las cuestiones más importantes de la física teórica parten de experimentos mentales sobre agujeros negros.

Sin embargo, hay un problema: este tipo de experimentos pueden estar demasiado alejados de los datos empíricos para comprobarlos.

NIGEL HOLMES (*ilustraciones*)

la relatividad general y la teoría cuántica de campos, nos encontramos con que los agujeros negros se evaporan: debido a efectos cuánticos, van radiando su masa poco a poco. También vemos que este proceso no es reversible: independientemente de la composición del agujero negro, su evaporación siempre produce el mismo baño de radiación genérico, del que no es posible obtener ningún tipo de información sobre lo que el agujero contiene. Sin embargo, un proceso así está prohibido en la teoría cuántica, que establece que, en principio, cualquier suceso puede ser revertido en el tiempo. Por ejemplo, de acuerdo con las leyes de la mecánica cuántica, los restos que se producen al quemar un libro aún contienen toda la información necesaria para rehacerlo, si bien no es de fácil acceso. Esto no sucede en la evaporación de los agujeros negros. Y, por tanto, nos encontramos con una paradoja, una incoherencia lógica. La unión de la mecánica cuántica con la relatividad general nos dice que los agujeros negros se tienen que evaporar, pero podemos concluir que el resultado es incompatible con la mecánica cuántica. Tiene que haber algún error, pero ¿dónde?

Los experimentos mentales creados para explorar esta paradoja proponen que nos imaginemos a dos observadores, Alicia y Benito, que comparten partículas entrelazadas (esos entes fantasmales del experimento EPR). Alicia, junto con su partícula, se tira al agujero negro, mientras que Benito permanece alejado en el exterior. Sin Alicia, Benito solo tiene una partícula común y corriente cuyo espín podría arrojar al ser medido tanto «arriba» como «abajo»; la información que compartía con su compañera de entrelazamiento se ha perdido, junto con Alicia.

Alicia y Benito cumplen una función importante en una de las soluciones a la paradoja más apreciadas, la llamada complementariedad de los agujeros negros. Fue propuesta en 1993 por Leonard Susskind, Lárus Thorlacius y John Uglum, todos por aquel entonces en la Universidad Stanford, y se basa en la regla de oro de Einstein para un *Gedankenexperiment*: centrarse de forma estricta en lo que se puede medir. Susskind y sus colegas simplemente establecieron como premisa que la información que caía con Alicia tenía que emerger con posterioridad junto con la radiación que emite el agujero negro al evaporarse. Esta situación crearía, por lo usual, otra inconsistencia, ya que la mecánica cuántica tan solo permite emparejamientos entrelazados con una sola compañera a la vez, propiedad conocida como «monogamia» del entrelazamiento. Por tanto, si la partícula de Benito está entrelazada con la de Alicia, no puede estarlo con nada más. Sin embargo, la complementariedad de los agujeros negros requiere que la partícula de Benito esté entrelazada con la de Alicia y con la radiación que después emite el agujero negro, aunque esto viole la monogamia. A primera vista, la complementariedad de los agujeros negros parece estar intercambiando tan solo una inconsistencia por otra.

Pero, como en un crimen perfecto, si nadie es testigo de la inconsistencia, quizá sea posible subvertir las leyes, en otro caso estrictas, de la naturaleza. La complementariedad de los agujeros negros se basa en el argumento de que es físicamente imposible que algún observador pueda ver las partículas de Alicia y Benito rompiendo las reglas.

Imaginemos ahora a un tercer observador, Carlos, cerca del agujero negro. Observa cómo Benito permanece fuera y Alicia cae en el interior, y va midiendo mientras tanto la radiación que emana del objeto. En teoría, esta podría chivarle que Alicia y Benito han violado la monogamia de su entrelazamiento. Pero, para saberlo a ciencia cierta, Carlos debería comparar sus observaciones no solo con las de Benito, sino también con las de Alicia, quien está atrapada en el interior. Así que tendría que entrar en el agujero negro y decirle a Alicia lo que ha encontrado. Susskind y Thorlacius demostraron que, por mucho que Carlos se esfuerce, nunca podrá entrar y comparar su información con la de Alicia antes de que ambos sean despedazados por la intensa gravedad. Su penoso destino sugiere que nadie que esté cerca de un agujero negro podrá jamás medir ninguna violación de las leyes cuánticas.

Pero no todos los teóricos están convencidos. Una crítica reciente sugiere que la complementariedad violaría el principio de equivalencia de Einstein, el asociado a su experimento mental del ascensor. Según este, dado que un observador en caída libre no percibe ningún campo gravitatorio, quien cruce el horizonte de sucesos de un agujero negro no debería sentir nada especial.

Sin embargo, si la radiación que Benito ve muy lejos del horizonte contiene toda la información que desapareció con Alicia, dicha radiación tendría que haber sido emitida con una energía muy elevada, ya que de lo contrario no habría podido vencer la intensa atracción gravitatoria del agujero negro. Y esa energía debería bastar para vaporizar a todo aquel que intentase atravesar el horizonte. Así pues, un observador en caída libre se toparía con un «muro de fuego» al llegar al horizonte, lo que violaría el principio de equivalencia de Einstein.

Para llegar hasta aquí hemos tenido que aventurarnos en las profundidades de lo teórico. Tal vez nunca conozcamos las soluciones de estos enigmas. Pero, dado que podrían ayudarnos a entender la naturaleza cuántica del espaciotiempo, estos son, para bien o para mal, unas de las áreas de investigación actuales más vivas en física teórica. Y todo ello gracias a las reflexiones de Einstein sobre los ascensores en caída libre.

PARA SABER MÁS

Einstein's dice and Schrödinger's cat: How two great minds battled quantum randomness to create a unified theory of physics. Paul Halpern. Basic Books, 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Los agujeros negros y la paradoja de la información. Leonard Susskind en *IyC* junio de 1997.
El principio de localidad. David Z. Albert y Rivka Galchen en *IyC* mayo de 2009.
Agujeros negros y muros de fuego. Joseph Polchinski en *IyC* abril de 2015.

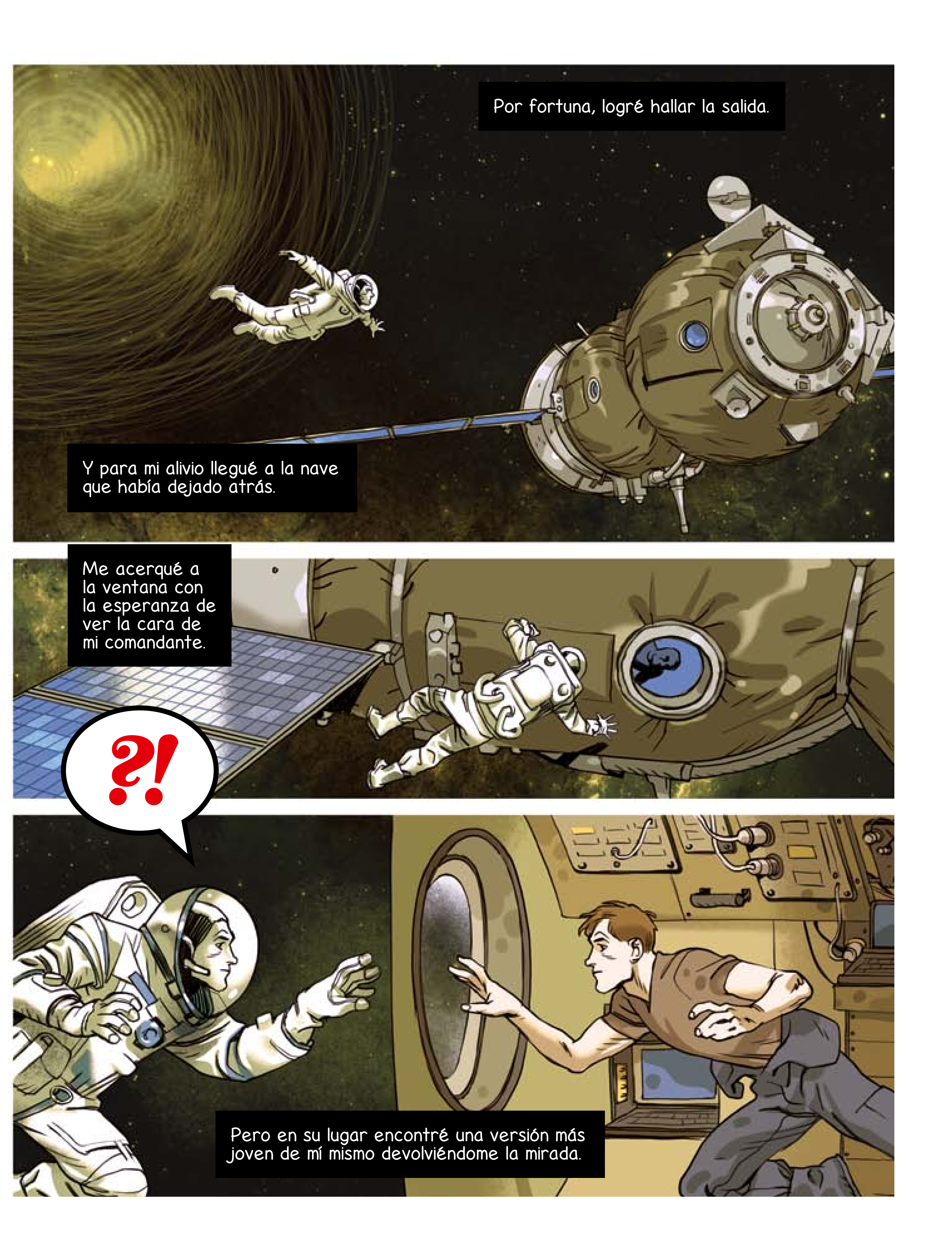
FÍSICA TEÓRICA

UNA BREVE HISTORIA DE LOS VIAJES EN EL TIEMPO

Ya contamos con los medios para viajar al futuro, pero las matemáticas de los viajes al pasado siguen planteando nuevas preguntas

Tim Folger




Por fortuna, logré hallar la salida.
Y para mi alivio llegué a la nave que había dejado atrás.
Me acerqué a la ventana con la esperanza de ver la cara de mi comandante.
?!
Pero en su lugar encontré una versión más joven de mí mismo devolviéndome la mirada.

Tim Folger escribe para *National Geographic*, *Discover* y otras publicaciones estadounidenses. Es también editor de la serie *The best american science and nature writing* («Los mejores escritos estadounidenses sobre ciencia y naturaleza»), una antología anual publicada por Houghton Mifflin.



H. G. Wells publicó *La máquina del tiempo* en 1895, pocos años antes de que concluyesen las seis décadas durante las cuales la reina Victoria ocupó el trono del Reino Unido. Poco después expiraría otro reinado incluso más duradero: el de los doscientos años de la física newtoniana. En 1905, la teoría de la relatividad especial de Einstein suplantó las leyes de Newton y, para deleite de Wells, permitió algo que estas tenían prohibido: los viajes al futuro. En el universo de Newton, el tiempo permanecía inmutable siempre y en todo lugar; nunca se aceleraba ni frenaba. Pero, para Einstein, el tiempo era relativo.

Viajar en el tiempo es algo más que una mera posibilidad: ha ocurrido ya, aunque no exactamente como lo imaginó Wells. Según J. Richard Gott, astrofísico de la Universidad de Princeton, el viajero temporal más experimentado hasta la fecha es el cosmonauta ruso Serguéi Krikaliov, quien a lo largo de su carrera ha pasado 803 días en el espacio. Einstein demostró que el tiempo transcurre con mayor lentitud para los objetos en movimiento que para aquellos que se encuentran en reposo. Por tanto, dado que Krikaliov volaba a 27.000 kilómetros por hora cuando estaba a bordo de la estación espacial Mir, para él el tiempo no avanzaba a la misma velocidad que en la Tierra. Durante todas sus estancias en órbita, Krikaliov envejeció 1/48 segundos menos que sus colegas terrestres. O, visto de otra forma, viajó 1/48 segundos hacia el futuro.

El efecto de los viajes en el tiempo resulta más fácil de apreciar con distancias y velocidades mayores. Si Krikaliov realizase un viaje de ida y vuelta a Betelgeuse (una estrella situada a unos 520 años luz de nuestro planeta) al 99,995 por ciento de la velocidad de la luz, regresaría solo diez años más viejo. Pero, al volver, descubriría que todos sus conocidos habrían muerto mucho tiempo atrás, ya que en la Tierra habrían transcurrido mil años. «Sabemos que podemos viajar al futuro», asegura Gott. «Es solo cuestión de dinero e ingeniería.»

Saltar unos pocos nanosegundos —o unos cuantos siglos— hacia el futuro resulta relativamente sencillo si dejamos a un lado los desafíos técnicos. Pero viajar al pasado es otra cosa. La teoría especial de la relatividad lo prohibía. Sin embargo, diez años después, la relatividad general levantó dicha restricción. A pesar de ello, la manera concreta en que alguien podría ir hacia atrás en el tiempo plantea un insidioso problema, ya que las ecuaciones de Einstein admiten un gran número de soluciones. Cada una de ellas asigna ciertas propiedades al universo, y solo algunas generan la clase de condiciones que permitirían los viajes al pasado.

Los expertos ignoran si alguna de esas soluciones describe el universo en que vivimos. Pero el estudio del problema ha dado lugar a preguntas aún más profundas. ¿Cuánto hace falta retocar la física fundamental para permitir los viajes al pasado? ¿Prohíbe la naturaleza esos retrocesos temporales aunque las ecuaciones de Einstein no lo hagan? Los físicos siguen especulando al respecto, pero no porque piensen que los viajes en el tiempo serán útiles algún día, sino porque analizar las posibles respuestas les ha facultado para entender mejor algunos aspectos sorprendentes de nuestro universo, incluido quizá su propio origen.

ASAF HANUKA (*páginas anteriores*); NIGEL HOLMES (*ilustraciones*)

EN SÍNTESIS

Moverse a grandes velocidades equivale a viajar al futuro. Los viajes al pasado parecen paradójicos, pero la relatividad general no los prohíbe.

La teoría de Einstein permite la existencia de curvas temporales cerradas, caminos en el espaciotiempo que pueden llevarnos a un punto de nuestro pasado.

Los físicos intentan entender si la naturaleza posee algún mecanismo que impida la formación de esos bucles temporales. Por el momento no han encontrado ninguno.

Algunos trabajos han apuntado que las curvas temporales cerradas podrían haber permitido algo sorprendente: que el universo se crease a sí mismo.

UNA NUEVA MANERA DE ENTENDER EL TIEMPO

Con la teoría especial de la relatividad Einstein convirtió el tiempo en una entidad maleable. Ello debió complacer a Wells, quien, de forma casi profética, ya creía que el espacio y el tiempo formaban parte de una misma urdimbre tetradimensional. Einstein llegó a dicho resultado al explorar las implicaciones de dos ideas fundamentales. Primero razonó que las leyes de la física deberían ser las mismas para cualquier observador en cualquier lugar del universo. Después se percató de que la velocidad de la luz tendría que permanecer constante con independencia del punto de vista. Si todos los observadores experimentan las mismas leyes físicas, todos ellos deberían obtener el mismo resultado al medir la velocidad de la luz.

Para convertir la velocidad de la luz en un límite universal, Einstein se vio obligado a echar por tierra dos nociones muy arraigadas en nuestro sentido común: que todos los observadores obtienen el mismo resultado al medir una misma longitud, y que para todos ellos el tiempo transcurre a idéntico ritmo. El físico alemán demostró que un reloj en movimiento funcionaría más despacio que uno en reposo. De igual modo, una regla que avanzase a toda velocidad vería reducida su longitud. Sin embargo, para alguien que viajase a la misma velocidad que el reloj o que la regla, el paso del tiempo y la longitud del objeto parecerían normales.

A velocidades ordinarias, la distorsión del espacio y el tiempo debida a la relatividad especial resulta inapreciable. Pero no ocurre lo mismo cuando consideramos velocidades próximas a la de la luz. Por ejemplo, numerosos experimentos han confirmado que la vida media de los muones (ciertas partículas elementales inestables) aumenta un orden de magnitud cuando viajan a velocidades cercanas a la de la luz. Los muones veloces son, de hecho, minúsculos viajeros temporales («krikaliovs» subatómicos) que saltan algunos nanosegundos hacia el futuro.

EL UNIVERSO DE GÖDEL

Así pues, los muones, las reglas y los relojes muy veloces viajan al futuro. ¿Podrían dar marcha atrás? El primero que usó la relatividad general para describir un universo que permitía viajar hacia atrás en el tiempo fue Kurt Gödel, el famoso creador de los teoremas de incompletitud, que delimitan lo que se puede demostrar o no en matemáticas. Gödel fue uno de los mejores matemáticos del siglo xx. Y también uno de los más raros: entre sus múltiples manías figuraba una dieta basada en laxantes y comida para bebés.

Gödel presentó a Einstein su modelo como regalo por su septuagésimo cumpleaños. Aquel universo exhibía dos propiedades únicas. En primer lugar, rotaba. Ello generaba una fuerza centrífuga que impedía que la materia colapsase sobre sí misma, gracias a lo cual lograba la estabilidad que Einstein había estado buscando en sus modelos cosmológicos. Pero, además, permitía viajar atrás en el tiempo, un aspecto que incomodó profundamente a Einstein. En el universo de Gödel, un astronauta podía trasladarse hasta alcanzar un punto de su propio pasado, como si completase un circuito en torno a un cilindro gigante. Esta clase de trayectorias en el espaciotiempo reciben el nombre de «curvas temporales cerradas».

Una curva temporal cerrada no es más que un camino en el espaciotiempo que vuelve sobre sí mismo. En el cosmos en rotación de Gödel, tales curvas daban la vuelta a todo el universo, como un paralelo en la superficie de la Tierra. Con el paso de los años, los físicos han encontrado numerosos tipos de curvas temporales cerradas. Todas permiten viajar al pasado, al menos en teoría. Sin embargo, recorrer cualquiera de ellas resultaría decepcionantemente ordinario. A través de las ventanillas de nuestra nave espacial no veríamos más que estrellas y planetas, el paisaje típico del espacio profundo. Pero, además, nuestros relojes seguirían marcando el tiempo del modo habitual. Las manecillas nunca comenzarían a girar hacia atrás, por más que estuviésemos siguiendo un camino que nos llevase a un punto del espaciotiempo perteneciente a nuestro pasado.

«Ya en 1914 Einstein estaba al tanto de que las curvas temporales cerradas podrían existir», señala Julian Barbour, físico teórico independiente radicado cerca de Oxford. Barbou recuerda que, al respecto, Einstein dijo una vez que su intuición se oponía «visceralmente» a dicha posibilidad. Tales curvas crearían todo tipo de problemas relacionados con la causalidad: ¿cómo puede cambiarse el pasado si ya ha ocurrido? Sin olvidar la clásica paradoja del abuelo: ¿qué le sucede a un viajero temporal enloquecido que mata a su abuelo antes de que este conozca a su abuela? ¿Llegaría a nacer?



GETTY IMAGES (*fotografía*)

VIAJERO EXPERIMENTADO: En sus 803 días en órbita, Serguéi Krikaliov (*izquierda*) ha viajado 1/48 segundos hacia el futuro.

Por fortuna para los amantes de la causalidad, los astrónomos no han encontrado ninguna prueba de que nuestro universo esté rotando. Parece que el propio Gödel escudriñó catálogos enteros de galaxias buscando indicios sobre la veracidad de su modelo. Pero, aunque el universo de Gödel no se correspondiese con la realidad, lo que sí demostró fue que las curvas temporales cerradas son perfectamente compatibles con las ecuaciones de la relatividad general. Las leyes de la física no prohíben viajar al pasado.

UNA POSIBILIDAD MOLESTA

Durante las últimas décadas, los físicos han empleado las ecuaciones de Einstein para construir diferentes tipos de curvas temporales cerradas. Gödel conjuró un universo completo que las permitía, pero lo mismo puede lograrse deformando algunas zonas concretas del espacio.

Según la relatividad general, los planetas, las estrellas y, en general, los cuerpos masivos curvan el espaciotiempo. A su vez, este espaciotiempo deformado guía el movimiento de los cuerpos. En palabras del célebre John Wheeler, ya fallecido: «El espaciotiempo le dice a la materia cómo moverse, y esta dice al espaciotiempo cómo curvarse». En casos extremos, el espaciotiempo puede doblarse lo suficiente para crear un pasadizo que conecta el presente con el pasado.

Los físicos han propuesto varios mecanismos exóticos para crear tales desfiladeros. En un artículo de 1991, Gott demostró que las cuerdas cósmicas (estructuras infinitamente largas y más finas que un átomo que podrían haberse formado en el universo primitivo) permiten la existencia de curvas temporales cerradas allí donde dos de ellas se cruzan. En 1983, Kip Thorne, físico del Instituto de Tecnología de California (Caltech), estudió la posibilidad de que ciertas configuraciones llamadas agujeros de gusano («túneles» entre dos regiones del espaciotiempo) permitiesen viajar al pasado. «En relatividad general, si se conectan dos zonas del espacio se están conectando también dos regiones del tiempo», apunta Sean M. Carroll, compañero de Thorne en el Caltech.

La entrada en un agujero de gusano sería esférica: una puerta tridimensional a un túnel tetradimensional en el espaciotiempo. Y, como ocurre con todas las curvas temporales cerradas, atravesar un agujero de gusano no se diferenciaría de un viaje ordinario. «No es que desaparezcas y te reconstituyas en otro momento del tiempo. No existe ninguna teoría respetable que permita ese tipo de viajes que vemos en la ciencia ficción», explica Carroll. «Para todos los viajeros, hagan lo que hagan, el tiempo fluye hacia delante segundo a segundo. Lo que ocurre es que esa noción de "adelante" puede estar globalmente desajustada con la del resto del universo», señala el investigador.

Aunque resulte posible escribir las ecuaciones que describen los agujeros de gusano y otras curvas temporales cerradas, todos los casos sufren problemas serios. «Los agujeros de gusano necesitan energía negativa», apunta Carroll. Esta última aparece cuando la energía en una zona del espacio fluctúa de manera espontánea hasta un valor menor que cero. Sin energía negativa, la entrada esférica y el túnel tetradimensional del agujero de gusano implosionarían al instante. Pero, según el investigador, un agujero de gusano mantenido por energía negativa sería algo difícil o incluso imposible de conseguir. «Las energías negativas no parecen ser nada bueno en física», subraya.

Pero incluso si la energía negativa mantuviera abierto un agujero de gusano, justo antes de que pudiéramos convertirlo en una máquina del tiempo las partículas lo atravesarían y volverían a entrar de nuevo infinitas veces, aclara Carroll. Algo así implicaría una cantidad ilimitada de energía. Y, dado que la energía deforma el espaciotiempo, todo el sistema colapsaría y se convertiría en un agujero negro. «No estamos seguros al cien por cien de que eso ocurra. Pero parece plausible que la naturaleza no nos permita construir máquinas del tiempo porque, en su lugar, produce agujeros negros», apunta el investigador.

Los agujeros negros últimos constituyen una consecuencia natural de la relatividad general. En cambio, los agujeros de gusano y las curvas temporales cerradas aparecen como construcciones completamente artificiales que ponen a prueba los límites de la teoría. En palabras de Carroll: «Los agujeros negros son difíciles de evitar. Las curvas temporales cerradas son difíciles de hacer».

Aunque los agujeros de gusano parezcan poco admisibles desde un punto de vista físico, no deja de resultar notorio que encajen en la teoría general de la relatividad. «Es muy curioso que estemos a punto de eliminar la posibilidad de los viajes en el tiempo pero que no podamos hacerlo por completo. Es irritante», señala Carroll exasperado por la permisividad de la bella teoría de Einstein. Sin embargo, analizar tan molesta posibilidad quizá permita a los físicos entender mejor el universo en que vivimos. De hecho, si el universo no permitiera los viajes al pasado, tal vez nunca hubiese llegado a existir.

¿SE CREÓ EL UNIVERSO A SÍ MISMO?

Si la relatividad general describe el universo a las mayores escalas, la mecánica cuántica lo hace a las más pequeñas. Esta teoría proporciona otra posible ruta hacia las curvas temporales cerradas: una que nos conduce hasta el origen del universo.

«A escalas diminutas (del orden de 10^{-30} centímetros) podemos esperar que la topología del espaciotiempo fluctúe. Y tales fluctuaciones podrían generar curvas temporales cerradas si nada fundamental se lo impide», explica John Friedman, físico de la Universidad de Wisconsin-Milwaukee. ¿Podrían magnificarse dichas fluctuaciones y emplearse como máquinas del tiempo? «No existe ninguna demostración formal de que las curvas temporales cerradas macroscópicas no puedan existir», señala Friedman. «Pero la gente que ha estudiado estas cuestiones apostaría fuertemente en contra.»

No hay duda de que la creación de un bucle en el espaciotiempo a escala cuántica o cósmica requeriría una física extrema. Y el lugar con mayores probabilidades de encontrarlas, dice Gott, es el principio del universo.

En 1998, Gott y Li-Xin Li, ahora en la Universidad de Pekín, publicaron un artículo en el que argumentaban que las curvas temporales cerradas no solo eran posibles, sino que podrían resultar esenciales para explicar el origen del universo. «Investigamos la posibilidad de que el universo fuese su propia madre;

de que un bucle temporal al principio del universo permitiese que el universo se crease a sí mismo», explica Gott.

Al igual que ocurre en la cosmología estándar de la gran explosión, el universo de Gott y Li «comienza» con una fase inflacionaria: un período en el que un campo de energía ubicuo causa la expansión inicial del cosmos. Hoy numerosos cosmólogos creen que, además del nuestro, la inflación tuvo que haber generado incontables universos [*véase* «El universo inflacionario autorregenerante», por Andréi Linde; Investigación y Ciencia, enero de 1995, *y* «La inflación a debate», por Paul J. Steinhardt; Investigación y Ciencia, junio de 2011]. «La inflación resulta muy difícil de detener una vez que ha comenzado», señala Gott. «Produce infinitas ramas. Nosotros seríamos una de ellas, pero la pregunta es: ¿dónde se originó el tronco? Nuestro trabajo mostró que una de las ramas pudo haberse enrollado sobre sí misma y crecer hasta convertirse en el tronco.»

Un bosquejo bidimensional del universo autonaciente de Gott y Li se parecería a un número seis, con el bucle espaciotemporal abajo y nuestro universo en el trazo superior. Los investigadores propusieron que un estallido inflacionario habría permitido al universo escapar del bucle temporal y expandirse hasta convertirse en el cosmos que habitamos hoy.

Su modelo resulta difícil de visualizar, pero Gott aduce que su principal atractivo reside en que evita la necesidad de crear un universo de la nada. Sin embargo, autores como Alexander Vilenkin, de la Universidad Tufts, Stephen Hawking, de Cambridge, y James Hartle, de la Universidad de California en Santa Bárbara, han propuesto modelos en los que, de hecho, el universo surge de la nada. Según las leyes cuánticas, el vacío se halla repleto de partículas virtuales que surgen y desaparecen de manera espontánea, por lo que cabe la posibilidad de construir modelos en los que el cosmos nace a partir de ese caldo cuántico. Con todo, Gott opina que el universo sí emergió a partir de algo: de sí mismo.

UN AJEDREZ CÓSMICO

Hoy por hoy no existe ninguna manera de comprobar si alguna de esas teorías explica el origen del universo. El célebre Richard Feynman comparó una vez el cosmos con una gran partida de ajedrez disputada por dioses. Los científicos intentan entender el juego sin conocer las reglas. Vemos a los dioses mover un peón una casilla hacia delante y aprendemos una: los peones siempre avanzan un escaque. Pero ¿qué ocurre si nos hemos perdido el comienzo de la partida, cuando los peones pueden moverse dos casillas? También supondremos que un peón es siempre un peón si nunca hemos visto a uno transformarse en una dama. «Diríamos que eso va contra las reglas», dice Gott. «¡No se puede cambiar un peón por una dama! Pues bien, sí se puede. Simplemente, nunca lo habíamos presenciado. La investigación sobre los viajes en el tiempo es algo parecido. Ponemos a prueba las leyes de la física en condiciones extremas. No hay nada lógicamente imposible en los viajes al pasado, solo que no se corresponde con el universo al que estamos acostumbrados.» Convertir un peón en una dama podría ser una de las leyes de la relatividad.

Las ideas tan sumamente especulativas parecen estar más cerca de la filosofía que de la física. Pero, por ahora, la mecánica cuántica y la relatividad general —teorías tan potentes como antiintuitivas— constituyen nuestras únicas herramientas para entender el universo. «Cuando la gente empieza a meter la mecánica cuántica y la relatividad general en esto, lo primero que hay que aclarar es que no tienen ni idea de lo que están haciendo», señala Tim Maudlin, filósofo de la ciencia de la Universidad de Nueva York. «No son matemáticas rigurosas. Se trata de un formalismo matemático con aspecto de relatividad general mezclado de manera incoherente con otro que parece mecánica cuántica. Pero es lo que hay que hacer, ya que nadie sabe cómo avanzar en una dirección que tenga sentido.»

¿Llegará el día en que una nueva teoría elimine de una vez por todas la posibilidad de viajar al pasado? ¿O, una vez más, resultará que vivimos en un universo mucho más extraño de lo que habíamos imaginado? La física ha avanzado a pasos agigantados desde que Einstein redefiniese la idea de tiempo. Los viajes temporales, que hasta principios del siglo xx existían solo en ficciones como la de Wells, son hoy una realidad, al menos en un sentido. ¿Tan difícil resulta creer que en el universo exista algún tipo de simetría que permita avanzar en el sentido contrario? Al ser preguntado al respecto, Gott replica con una anécdota:

«Se cuenta que, una vez, Einstein estaba hablando con un tipo cuando este sacó una libreta y apuntó algo. Einstein le preguntó qué era aquello, a lo que el hombre respondió: "Una libreta. Cada vez que se me ocurre una buena idea la apunto aquí". Einstein replicó: "Yo nunca he necesitado una libreta; en mi vida solo he tenido tres buenas ideas".»

«Creo que estamos esperando una nueva buena idea», concluye Gott.

PARA SABER MÁS

Rules for time travelers. Sean Carroll en **www.preposterousuniverse.com/blog/2009/05/14/rules-for-time-travelers**, mayo de 2009.

Time travel and modern physics. Frank Amtzenius y Tim Maudin en *Stanford Encyclopedia of Philosophy*, **plato.stanford.edu/entries/time-travel-phys**, diciembre de 2009.

When Einstein met H. G. Wells: Encounters in the fourth dimension. Ethan Siegel en **https://medium.com/starts-with-a-bang/when-einstein-met-h-g-wells-425372d21821**, enero de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La máquina del tiempo. Paul Davies en *IyC*, noviembre de 2002.

ASTROFÍSICA

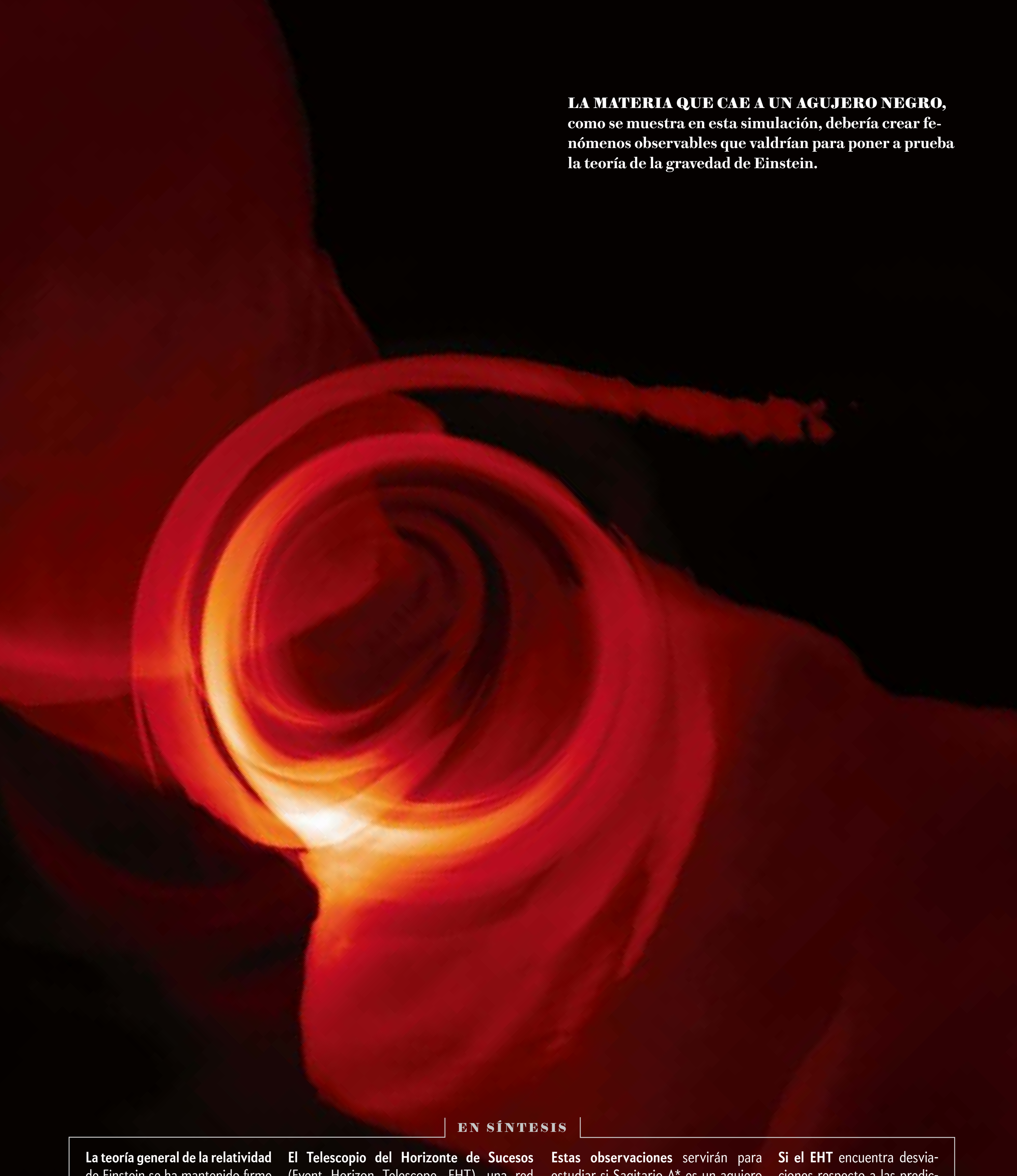
LA PRUEBA DEL AGUJERO NEGRO

Nunca se ha puesto a prueba la relatividad general en lugares donde los efectos de la gravedad se vuelven verdaderamente extremos, como en el borde de un agujero negro. Eso cambiará pronto

Dimitrios Psaltis y Sheperd S. Doeleman

Se lleva todo un siglo tratando de encontrarle fallos a la teoría general de la relatividad de Albert Einstein. Hasta ahora, sin embargo, la teoría lo ha tenido fácil: todas las comprobaciones se han llevado a cabo en campos gravitatorios bastante débiles. Si queremos someter la relatividad general a su prueba más exigente, tendremos que ver si sigue siendo válida cuando la gravedad es intensísima. Y en el universo actual no hay ningún lugar donde la gravedad sea más intensa que en el borde de un agujero negro, en su horizonte de sucesos: la frontera tras la cual la gravedad es tan abrumadora que la luz y la materia que la atraviesan ya no pueden escapar.

No es posible observar el interior de un agujero negro, pero el campo gravitatorio a su alrededor hace que la materia próxima al horizonte produzca enormes cantidades de radiación electromagnética, que los telescopios sí pueden detectar. Cerca del agujero negro, la demoledora fuerza de la gravedad



LA MATERIA QUE CAE A UN AGUJERO NEGRO, como se muestra en esta simulación, debería crear fenómenos observables que valdrían para poner a prueba la teoría de la gravedad de Einstein.

EN SÍNTESIS

La teoría general de la relatividad de Einstein se ha mantenido firme durante un siglo, pero nunca se la ha puesto a prueba donde la gravedad es intensísima, tal y como ocurre en el borde de un agujero negro.

El Telescopio del Horizonte de Sucesos (Event Horizon Telescope, EHT), una red global de radiotelescopios, llevará a cabo este tipo de pruebas gracias a que con él se podrá distinguir el horizonte de sucesos de Sagitario A*, el agujero negro del centro de la Vía Láctea.

Estas observaciones servirán para estudiar si Sagitario A* es un agujero negro o algún tipo de objeto más peculiar, como una singularidad desnuda. Y si se trata de un agujero negro, ¿se comporta como predice la relatividad general?

Si el EHT encuentra desviaciones respecto a las predicciones de Einstein, otros instrumentos que comenzarán a funcionar en los próximos años lo comprobarán por vías independientes.

comprime la materia entrante, el «flujo de acreción», de modo que su volumen sea más y más pequeño. La materia que cae al agujero alcanza entonces temperaturas de miles de millones de grados; irónicamente, las inmediaciones de un agujero negro se convierten en esas circunstancias en unos de los lugares más brillantes del cosmos.

Si observáramos un agujero negro con un telescopio tan potente que permitiese distinguir el horizonte de sucesos, podríamos seguir el descenso en espiral de la materia hacia el punto de no retorno y ver si se comporta como predice la relatividad general. Pero diseñar un telescopio de este tipo presenta dificultades. En particular, tenemos que lidiar con el diminuto tamaño que tiene un agujero negro visto desde la Tierra. Esto es cierto incluso para los agujeros negros supermasivos que ocupan, según se piensa, el centro de la mayoría de las galaxias: aunque son millones o miles de millones de veces más masivos que el Sol y, en algunos casos, tienen diámetros mayores que el de nuestro sistema solar, están tan lejos de la Tierra que subtienden ángulos diminutos en el cielo. El ejemplo más cercano es Sagitario A*, el agujero negro de cuatro millones de masas solares que se encuentra en el centro de la Vía Láctea; su horizonte de sucesos parecería tener un diámetro de tan solo 50 microsegundos de arco, como un DVD situado en la Luna. Para distinguir un objeto tan pequeño, un telescopio necesita una resolución angular más de 2000 veces mayor que la del telescopio espacial Hubble.

Además, estos agujeros negros se nos ocultan de dos maneras distintas. En primer lugar, yacen justo en el centro de las galaxias, en lo más profundo de densas nubes de gas y polvo que bloquean la mayor parte del espectro electromagnético. En segundo lugar, el propio material emisor de luz que queremos detectar, ese brillante remolino de materia aplastada que viaja en espiral hacia el horizonte, es opaco para la mayoría de las longitudes de onda. En consecuencia, solo unas pocas longitudes de onda de la luz pueden escapar del borde del agujero negro y ser observadas en la Tierra.

El proyecto del Telescopio del Horizonte de Sucesos (EHT, por sus siglas en inglés) representa un esfuerzo internacional para superar esos obstáculos y efectuar observaciones detalladas de un agujero negro. Para alcanzar la resolución angular más alta posible desde la superficie de la Tierra, emplea una técnica conocida como interferometría de base muy larga (VLBI, por sus siglas en inglés): astrónomos de radiotelescopios de todo el mundo observan el mismo objeto al mismo tiempo, graban los datos en discos duros y luego los combinan mediante un superordenador para formar una única imagen. De esta manera se logra que muchos telescopios situados en diferentes continentes constituyan un telescopio virtual del tamaño de la Tierra. El poder de resolución de un telescopio viene dado por el cociente entre la longitud de onda de la luz observada y el tamaño del telescopio (cuanto menor es este cociente, mayor es la capacidad del telescopio de separar dos objetos muy próximos); así, la VLBI proporciona imágenes del cielo (en longitudes de onda de radio) con un detalle que supera con creces el aumento de cualquier telescopio óptico.

Gracias a mejoras en la VLBI, que permitirán que las observaciones se realicen a las longitudes de onda de radio más cortas, el EHT pronto será capaz de hacer frente a todas las dificultades que supone la observación de agujeros negros. A estas longitudes de onda (cercanas al milímetro), la Vía Láctea es en gran medida transparente, de modo que podrá observar Sagitario A* con una borrosidad causada por el gas interpuesto mínima. Estas mismas longitudes de onda también atraviesan la materia que cae al agujero negro, por lo que puede accederse con ellas a las regiones más cercanas al horizonte de sucesos de Sagitario A*. Y, por una maravillosa coincidencia, el aumento proporcionado por una batería de antenas de VLBI que se extiende por todo el globo terrestre y opera en longitudes de onda milimétricas es el adecuado para distinguir los horizontes de sucesos de los agujeros negros supermasivos más cercanos.

Paralelamente, se han creado modelos matemáticos y simulaciones por ordenador para estudiar muchos posibles resultados de estas observaciones. Novedosos algoritmos para superordenadores han simulado esa batidora de materia presente ante el horizonte de sucesos del agujero negro, y en cada simulación han visto que el agujero proyecta una «sombra» sobre la luz emitida por el flujo de acreción.

El físico James Bardeen, de la Universidad de Washington, predijo la existencia de estas sombras de agujero negro en 1973. Por definición, la luz que atraviesa el horizonte de sucesos nunca puede regresar. Bardeen identificó el punto fuera del horizonte en que un fotón orbitaría alrededor del agujero negro. Si un rayo de luz cruza esta órbita en dirección al agujero negro, queda atrapado para siempre y cae en espiral hacia el horizonte de sucesos. Los rayos de luz que se originan entre el horizonte y dicha órbita pueden escapar, pero tienen que viajar hacia el exterior en una dirección casi radial; si no, se arriesgan a que la gravedad del agujero negro los atrape también a ellos, curvando sus trayectorias hacia atrás, en dirección al horizonte de sucesos. Esta frontera recibe el nombre de órbita de fotones.

Por lo que se refiere a la luz, el agujero negro se comporta como un objeto opaco que se extiende hasta la órbita de fotones. Llamamos sombra al contraste que se produce entre el brillante anillo de la órbita de fotones y el interior, más oscuro. En realidad, según las predicciones, un observador en la Tierra vería esta sombra con un tamaño aparente mayor que la órbita de fotones. Esto ocurre porque el intenso campo gravitatorio alrededor del agujero negro actúa como una lente gravitacional que «amplifica» la sombra (*véase el recuadro del artículo* «Los errores de Einstein», por Lawrence M. Krauss, *en este mismo número*).

El EHT está ahora en disposición de observar esa sombra y otras características de los agujeros negros. En 2007 y 2009 se observaron Sagitario A* y otro agujero negro supermasivo, en el centro de la galaxia Virgo A (también conocida como M87), y se verificó que la tecnología era adecuada y el objetivo científico, alcanzable. Con estas primeras observaciones, que conectaron telescopios en Hawái, Arizona y California, se logró medir la

Dimitrios Psaltis es profesor de astronomía y física de la Universidad de Arizona. Ha sido pionero en el desarrollo de pruebas de la teoría general de la relatividad de Einstein en campos gravitatorios intensos mediante observaciones en el espectro electromagnético de agujeros negros y estrellas de neutrones.

Sheperd S. Doeleman es astrónomo del Instituto de Tecnología de Massachusetts y del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, donde dirige equipos que realizan observaciones de ultraalta resolución de agujeros negros. Coordina el proyecto del Telescopio del Horizonte de Sucesos.

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE CHI-KWAN CHAN, UNIVERSIDAD DE ARIZONA

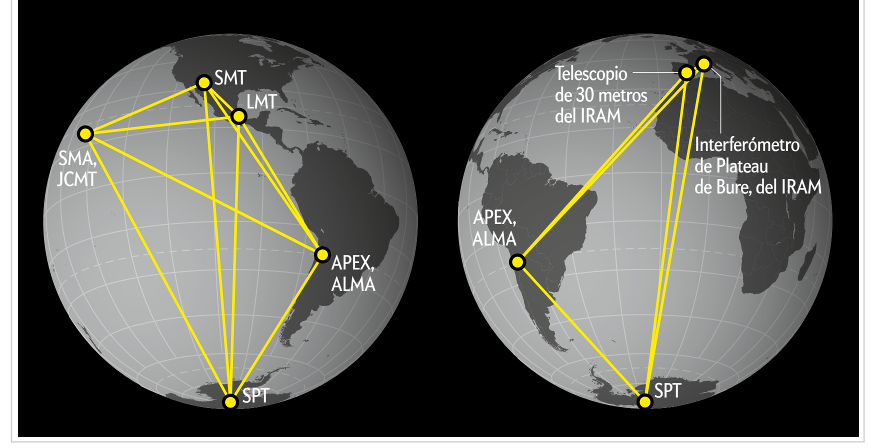
extensión en que se produce la emisión de radio de ambas fuentes a una longitud de onda de 1,3 milímetros. En ambos casos, las mediciones concordaron con el tamaño esperado de la sombra del agujero negro.

Las observaciones que se llevarán a cabo con toda la red de antenas, que cubrirá el planeta entero, proporcionarán datos suficientes para que podamos construir imágenes completas de estos agujeros negros. Otra serie de observaciones, igualmente importantes, usará los datos de VLBI para buscar y describir las trayectorias de las «manchas calientes», regiones localizadas y activas que giran alrededor del agujero negro. Dado que la relatividad general predice tanto la apariencia de los agujeros negros como la manera en que la materia debería orbitar a su alrededor, estos resultados nos permitirán realizar una serie de pruebas de la teoría de la relatividad de Einstein allí donde se han de manifestar sus predicciones más extremas.

FUNDAMENTOS

Un telescopio del tamaño de la Tierra

Al menos nueve radiotelescopios y baterías de radiotelescopios de todo el mundo formarán el Telescopio del Horizonte de Sucesos. Todos los radiotelescopios están situados a gran altitud para minimizar la absorción de las señales en la atmósfera de la Tierra. Al cubrir todo el globo y operar en longitudes de onda milimétricas, el conjunto alcanzará una resolución angular efectiva de unas pocas millonésimas de segundos de arco, suficiente para distinguir un DVD en la Luna. Estos son los integrantes: Conjunto Submilimétrico (SMA), Telescopio James Clerk Maxwell (JCMT), Telescopio Submilimétrico (SMT), Gran Telescopio Milimétrico (LMT), Experimento Pionero de Atacama (APEX), Gran Conjunto Milimétrico/Submilimétrico de Atacama (ALMA), Telescopio del Polo Sur (SPT), Instituto de Radioastronomía Milimétrica (IRAM).



TERRA CARTA (*mapas*)

VERIFICAR LA CENSURA CÓSMICA

Gracias al EHT podremos contestar una pregunta fundamental: ¿es Sagitario A* un agujero negro? Todos los indicios disponibles apuntan a que la respuesta es afirmativa, pero no se ha observado nunca un agujero negro directamente y hay otras posibilidades compatibles con la relatividad general. Por ejemplo, Sagitario A* podría ser una «singularidad desnuda».

En física, una singularidad es un lugar donde la solución a una ecuación no está definida y donde las leyes de la naturaleza, tal y como las conocemos, dejan de ser válidas. La relatividad general predice que el universo comenzó con una singularidad: un momento inicial en que todo el contenido del cosmos estaba concentrado en un único punto de densidad infinita. La teoría también nos dice que en el centro de todo agujero negro existe una singularidad, donde la gravedad se hace infinita y la materia se comprime hasta una densidad también infinita.

En el caso de un agujero negro, el horizonte de sucesos cubre la singularidad y la oculta al resto de nuestro universo. Sin embargo, la relatividad general no requiere que todas las singularidades estén «vestidas» con un horizonte. Hay un número infinito de soluciones de las ecuaciones de Einstein donde las singularidades están «desnudas». Algunas de estas soluciones describen agujeros negros normales que giran tan rápido que sus horizontes se han «abierto», descubriendo la singularidad de su interior; otras describen agujeros negros que no tienen un horizonte de sucesos.

Las singularidades desnudas, a diferencia de los agujeros negros, siguen siendo muy teóricas: no se ha descubierto un proceso realista que conduzca a su formación. Todas las simulaciones por ordenador del colapso gravitatorio de una estrella que desde el punto de vista astrofísico resultan verosímiles conducen a la formación de un agujero negro con horizonte. En 1969 Roger Penrose introdujo la hipótesis de la censura cósmica, según la cual la física censura de algún modo la desnudez de las singularidades y las cubre siempre con un horizonte.

En septiembre de 1991, los físicos John Preskill y Kip Thorne, del Instituto de Tecnología de California, apostaron con Stephen Hawking, de la Universidad de Cambridge, que la hipótesis de la censura cósmica es falsa y las singularidades desnudas en realidad existen. Dos décadas y media más tarde, la apuesta sigue en pie, suspirando por un experimento que la decida. Demostrar que Sagitario A* tiene un horizonte de sucesos no probaría de manera concluyente que no existen singularidades desnudas en otros lugares. Sin embargo, determinar que el agujero negro del centro de la Vía Láctea es una singularidad desnuda nos permitiría observar de manera directa fenómenos en circunstancias en las que la física moderna deja de ser válida.

EN BUSCA DE PELO

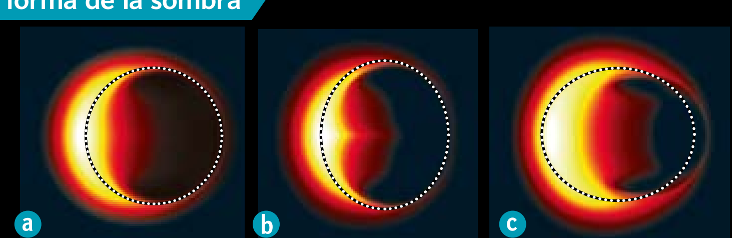
Rebatir la censura cósmica no supondría un golpe definitivo para la relatividad general; después de todo, sus ecuaciones permiten la existencia de singularidades desnudas. Pero también esperamos que el EHT ponga a prueba una idea que cuenta con una larga tradición en el estudio de los agujeros negros: el que se conoce como «teorema de no pelo». Y si este es falso, la relatividad general tendrá, como mínimo, que ser modificada; la demostración matemática de este teorema no deja otra salida.

El teorema dice que cualquier agujero negro rodeado por un horizonte de sucesos puede describirse por completo usando tan solo tres propiedades: la masa, el momento angular, o espín, y la carga eléctrica. En otras palabras: dos agujeros negros cualesquiera con la misma masa, espín y carga eléctrica serán completamente idénticos, del mismo modo que dos electrones cualesquiera son indistinguibles. Los agujeros negros, establece el teorema, no tienen «pelo»: ninguna irregularidad geométrica, ninguna característica distintiva.

Einstein, a prueba con agujeros negros

Los astrofísicos han creado modelos muy elaborados, basándose en la teoría general de la relatividad de Einstein, que predicen el comportamiento de la materia en las proximidades de un agujero negro. Las observaciones que realizará el Telescopio del Horizonte de Sucesos del agujero negro que hay en el centro de la Vía Láctea nos dirán si la realidad se ajusta a esas predicciones. Si no lo hace, puede que haya que modificar la teoría de Einstein.

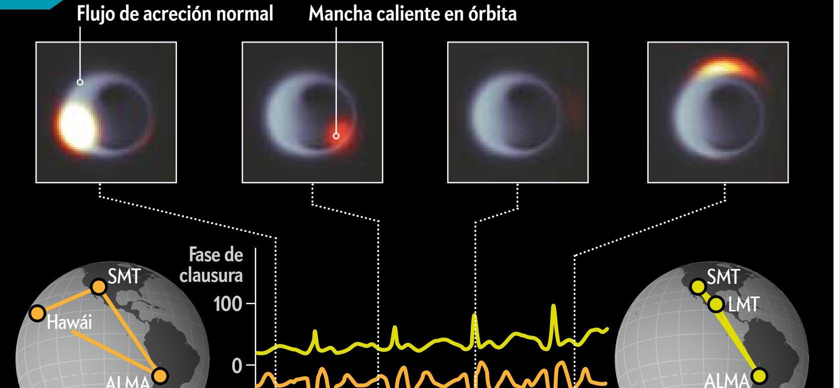
La forma de la sombra



Un agujero negro proyecta una «sombra» sobre las emisiones de la materia caliente que hay a su alrededor. La forma y el tamaño de la sombra dependen, en principio, de lo rápido que gire el agujero negro, de cuánto se curven los rayos de luz en sus proximidades (por efecto de la gravedad) y de la orientación del observador. Por una coincidencia, los tres efectos conspiran para que la sombra sea casi circular para todos los agujeros negros y observadores (a). Esto solo pasa si la teoría de Einstein es correcta y se satisface el «teorema de no pelo», que establece que un agujero negro queda descrito por su masa, espín y carga. Si las observaciones revelan una sombra elíptica, como la que se muestra en las imágenes (b) y (c), la teoría de Einstein no superará esta prueba.

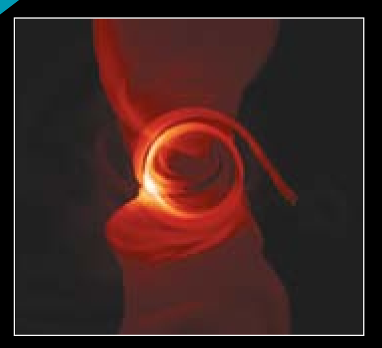
Seguirle el paso a la fase de clausura

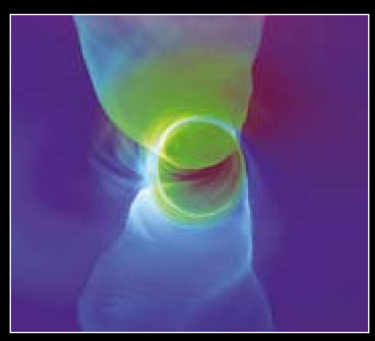
Junto a los agujeros negros a veces se producen destellos. Una posible explicación es que el flujo de acreción, normalmente regular, se altere por la presencia de «manchas calientes», regiones de mayor temperatura que orbitan alrededor del agujero negro y luego se disipan. El EHT empleará tríos de telescopios para medir la diferencia en los tiempos de llegada de la luz emitida por las manchas calientes; con estos datos es posible hallar la posición de las manchas por triangulación. La simulación de la derecha muestra una señal de este tipo (llamada fase de clausura) a partir de los datos de dos triángulos diferentes. La órbita de la mancha caliente crea un patrón similar al latido de un corazón, una signatura temporal en la fase de clausura. Medir estas señales permitirá cartografiar el espaciotiempo alrededor del agujero negro y poner a prueba las predicciones de la teoría de Einstein.



Simulación de una realidad compleja

Los científicos que participan en el EHT realizan con superordenadores elaboradas simulaciones numéricas de agujeros negros que presentan flujos de acreción. Se ha logrado que exhiban la complejidad que se espera de un objeto astrofísico. La imagen de la derecha representa un agujero negro en un estado de emisión bastante tranquilo; a la izquierda vemos una región magnéticamente activa durante una erupción. Gracias a estas simulaciones, se han creado algoritmos que permitirán deducir las propiedades de las sombras de los agujeros negros a partir de datos observacionales reales.





CORTESÍA DE AVERY E. BRODERICK, UNIVERSIDAD DE WATERLOO E INSTITUTO PERÍMETRO DE FÍSICA TEÓRICA (*a, b, c, y las cuatro imágenes superiores de «Seguirle el paso a la fase de clausura»*); CORTESÍA DE CHI-KWAN CHAN, UNIVERSIDAD DE ARIZONA (*las dos imágenes inferiores*); TERRA CARTA (*globos terráqueos*)

Cuando comenzamos a pensar en observar agujeros negros con VLBI, creíamos que podríamos usar la forma y el tamaño de las sombras para descubrir el espín y la orientación de los agujeros que las producen. Pero nuestras simulaciones nos depararon una sorpresa inesperada y, en última instancia, muy agradable. Independientemente de lo rápido que hiciésemos girar en nuestras simulaciones los agujeros negros y de dónde situásemos a nuestros observadores virtuales, la sombra del agujero negro era siempre casi circular y con un tamaño aparente unas cinco veces mayor que el radio del horizonte de sucesos. Por alguna afortunada coincidencia —si hay una razón física más honda, aún no la hemos descubierto—, cambiemos como cambiemos los parámetros de nuestros modelos, el tamaño y la forma de la sombra del agujero negro se mantienen prácticamente inalterados. Esta coincidencia es una excelente noticia si nuestro objetivo es poner a prueba la teoría de Einstein, ya que solo se produce si la teoría general de la relatividad es válida (*véase el recuadro* «Einstein, a prueba con agujeros negros»). Si Sagitario A* tiene

un horizonte de sucesos y el tamaño o la forma de su sombra se desvían de nuestras predicciones, se violaría el teorema de no pelo y, por tanto, la relatividad general.

TRAZAR ÓRBITAS

Las observaciones del EHT generarán muchos más datos aparte de los que se usan para formar imágenes. Las antenas registrarán la polarización completa de la radiación emitida por el entorno del agujero negro, lo que nos permitirá crear mapas de los campos magnéticos que haya cerca del horizonte de sucesos; esta cartografía podría ayudarnos a saber qué procesos físicos impulsan los poderosos chorros (haces de materia, de una energía extraordinaria, con velocidades cercanas a la de la luz a lo largo de distancias de miles de años luz) que emanan del centro de galaxias como M87. Se cree que la energía de estos chorros procede de los campos magnéticos que hay cerca del horizonte de sucesos de los agujeros negros supermasivos; cartografiar los campos magnéticos podría ayudarnos a comprobar esta hipótesis.

Al observar el movimiento de la materia alrededor de un agujero negro podríamos descubrir otras cosas. Se espera que los flujos de acreción alrededor de los agujeros negros sean muy turbulentos y variables. Las simulaciones por ordenador a menudo muestran en estos flujos la presencia de regiones magnéticamente activas, localizadas y efímeras, unas «manchas calientes» similares a las erupciones magnéticas que tienen lugar en la superficie del Sol. Estas manchas calientes, que podrían explicar las variaciones de brillo que a menudo presenta Sagitario A*, girarían alrededor del agujero negro (junto al flujo de acreción subyacente) casi a la velocidad de la luz; completarían una órbita en menos de media hora. En algunos casos, al moverse detrás del agujero negro sufrirían un efecto de lente gravitacional y generarían anillos de Einstein casi completos, unos brillantes círculos de luz distorsionada por la gravedad, como los que el telescopio espacial Hubble ha detectado en cuásares lejanos. En otros casos, perderían su energía y se disiparían tras orbitar alrededor del agujero negro unas cuantas veces.

Las manchas calientes podrían dificultar el proceso de formación de imágenes. Si alrededor del agujero negro orbita una mancha brillante del flujo de acreción, se verá difuminada, del mismo modo que la fotografía de un velocista quedará borrosa si el obturador de la cámara se deja abierto demasiado tiempo.

Pero gracias a las manchas calientes también podríamos realizar una prueba totalmente diferente de la relatividad general. El EHT puede hallar las órbitas de las manchas calientes usando una técnica que se conoce con el extravagante nombre de seguimiento de la variabilidad de la fase de clausura. El método consiste en medir las diferencias en los tiempos de llegada de la luz de la mancha caliente a tres telescopios y luego utilizar triangulación básica para inferir la posición de la mancha en el cielo. Las manchas calientes en órbita dejarán un sello distintivo en los datos en bruto recogidos por los telescopios. Y de la misma forma que las ecuaciones de Einstein predicen el tamaño y la forma de la sombra del agujero negro, también revelan todo lo que necesitamos saber acerca de las órbitas que deberían trazar las manchas calientes. Este modelo de las manchas calientes es algo esquemático, y la realidad quizá sea más compleja. A pesar de todo, cuando alcance su máxima sensibilidad, el EHT podrá observar estructuras en el flujo de acreción y seguirlas en su órbita alrededor del agujero negro; nos dará así otra manera de comprobar si las predicciones de la relatividad general siguen siendo válidas cerca del borde de un agujero negro.

PRUEBAS EXTRAORDINARIAS

¿Qué sucede si nuestras observaciones no parecen concordar con la teoría de Einstein? Empleando una expresión popularizada por Carl Sagan, afirmaciones extraordinarias requieren pruebas extraordinarias. En las ciencias naturales, estas a menudo consisten en una o más verificaciones de la aseveración correspondiente con métodos independientes entre sí. Las observaciones de potentes telescopios ópticos y de radio y de detectores de ondas gravitacionales situados en el espacio quizá nos proporcionen una comprobación de este tipo en los próximos años. Estudiarán las órbitas de estrellas, de estrellas de neutrones (objetos diminutos y densos producidos por el colapso gravitatorio de estrellas masivas) y de otros objetos que giran alrededor de agujeros negros supermasivos.

El interferómetro óptico GRAVITY, que está siendo construido para su uso en el Gran Telescopio (VLT) del Observatorio Europeo Austral en Chile, y la próxima generación de telescopios ópticos de 30 metros examinarán las órbitas de estrellas de nuestra galaxia que se encuentran muy cerca del horizonte de sucesos de Sagitario A* (a una distancia tan solo unos cientos de veces mayor que el radio del agujero negro). Una vez completada, la Batería del Kilómetro Cuadrado (SKA), un radiointerferómetro que se está construyendo en Sudáfrica y Australia, empezará a observar las órbitas de púlsares (estrellas de neutrones que giran rápidamente) en torno al mismo agujero negro. Y la Antena Espacial Evolucionada de Interferometría Láser (eLISA) detectará las ondas gravitacionales que se emiten cuando pequeños objetos compactos orbitan alrededor de los agujeros negros supermasivos de galaxias cercanas.

Debido a los fortísimos campos gravitatorios de los agujeros negros, las órbitas elípticas de estos objetos se irán desplazando (experimentarán precesión) rápidamente; este efecto es tan pronunciado que los puntos de máxima distancia al agujero negro deberían trazar un círculo completo en tan solo unas pocas órbitas. Al mismo tiempo, los agujeros negros arrastrarán el espaciotiempo con ellos, de modo que los planos orbitales de los objetos que haya allí también exhibirán precesión. Medir las velocidades de precesión orbital para objetos situados a diferentes distancias de un agujero negro conducirá a una reconstrucción tridimensional completa del espaciotiempo alrededor del agujero, y así se tendrán muchas maneras de poner a prueba la relatividad general en presencia de campos gravitatorios extremadamente intensos.

PARA SABER MÁS

Detecting flaring structures in Sagittarius A* with high-frequency VLBI. Sheperd S. Doeleman y otros en *Astrophysical Journal*, vol. 695, n.º 1, págs. 59-74, 10 de abril de 2009.

Testing the no-hair theorem with observations in the electromagnetic spectrum. II. Black hole images. Tim Johannsen y Dimitrios Psaltis en *Astrophysical Journal*, vol. 718, n.º 1, págs. 446-454, 20 de julio de 2010.

Jet-launching structure resolved near the supermassive black hole in M87. Sheperd S. Doeleman y otros en *Science*, vol. 338, págs. 355-358, 19 de octubre de 2012.

The power of imaging: Constraining the plasma properties of GRMHD simulations using EHT observations of Sgr A*. Chi-Kwan Chan y otros en *Astrophysical Journal*, vol. 799, n.º 1, art. 1, 20 de enero de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

Singularidades desnudas. Pankaj S. Joshi en *IyC*, abril de 2009.

Retrato de un agujero negro. Avery E. Broderick y Abraham Loeb en *IyC*, febrero de 2010.

FÍSICA TEÓRICA

LA BÚSQUEDA DE LA TEORÍA FINAL

Una nueva generación de físicos espera tener éxito allí donde Einstein fracasó

Corey S. Powell



El instrumento con el que Leslie Rosenberg intenta comprender el universo parece una improvisada caldera doméstica cubierta con cables y embutida en un gran frigorífico subterráneo. El experimento, alojado en un laboratorio adyacente a la Universidad de Washington, consta de una cámara de vacío superenfriada y equipada con un detector de axiones, una clase de partículas que, por el momento, siguen siendo cien por cien hipotéticas.

Rosenberg lleva tras ellas desde principios de los noventa, cuando era un investigador posdoctoral en la Universidad de Chicago. En todo este tiempo ha trabajado en un experimento tras otro, alcanzando una precisión cada vez mayor, pero siempre con el mismo resultado negativo. Con todo, no ceja en su empeño por lograr una detección que, a la postre, podría contribuir a rescatar la mayor —y más malhadada— idea de Albert Einstein.

EN SÍNTESIS

Einstein dedicó los últimos años de su vida a buscar la «teoría del campo unificado», una formulación unitaria que describiese todas las interacciones conocidas.

Su proyecto fracasó, en parte, porque no tuvo en cuenta la existencia de dos fuerzas fundamentales: las interacciones nucleares débiles y fuertes.

Hoy esa búsqueda continúa en varios frentes; entre ellos, la física experimental de partículas elementales, la cosmología y la física matemática.



CAZADORES DE PARTÍCULAS

LUGAR: Universidad de Washington, Seattle.

PROYECTO: El experimento ADMX, situado en el interior de una cámara de vacío magnetizada y enfriado a temperaturas próximas al cero absoluto, busca axiones, una clase de partículas hipotéticas que podrían explicar la composición de la materia oscura cósmica.

PROTAGONISTAS: (*fila trasera, de izquierda a derecha*) Ciera Cox, Nick Posey, James Sloan, Clifford Plesha, Richard Ottens, Josh Povick y Kerkira Stockton; (*primera fila, de izquierda a derecha*) Hannah LeTourneau, Leslie Rosenberg, Xavier Frost, Ana Malagón, Kiva Ramundo y Jacob Herr.

Llamada teoría del campo unificado, la idea es hoy popularmente conocida con el evocador nombre de «teoría del todo»: una formulación unitaria que abarque todas las interacciones fundamentales. Einstein comenzó esa búsqueda hace nueve décadas. Al gran teórico le incomodaba que las dos fuerzas que gobernaban el universo, la gravedad y el electromagnetismo, pareciesen seguir reglas distintas. Quería demostrar que toda la materia y la energía se regían por los mismos principios [*véase* «Sobre la teoría generalizada de la gravitación», por Albert Einstein, *en este mismo número*].

Condensar el universo en una sola ecuación era un proyecto tremendamente ambicioso incluso para Einstein. En 1920, en una carta muy citada a un estudiante de física alemán, el investigador escribió: «Deseo saber cómo Dios creó este mundo. No me interesan este o aquel fenómeno, el espectro de tal o cual elemento. Quiero conocer sus pensamientos. Lo demás son detalles».

Einstein persiguió sin éxito los pensamientos de Dios durante tres décadas, recorriendo un callejón sin salida tras otro. Cuando murió, en 1955, dejó escritas en su pizarra una serie de ecuaciones sin resolver sobre el campo unificado.

La tarea de la unificación quedó en manos de las siguientes generaciones de físicos, quienes acabarían dividiendo el problema en múltiples partes. Lo que empezó como la gran visión de un genio se transformó en una tarea lenta y agotadora llevada a cabo por varios grupos de investigadores, cada uno centrado en una pequeña pieza de un gigantesco rompecabezas cósmico. Rosenberg no se obsesiona con la teoría del todo. Sus esfuerzos se concentran en un problema específico: el axión. En caso de existir, esta partícula podría evitar la necesidad de modificar las ecuaciones de la gravedad de Einstein. «Veremos qué dicen los datos», aclara Rosenberg. «No me interesa leer la mente de Dios.»

A pesar de perseguir un objetivo muy concreto, Rosenberg y sus compañeros no apartan los ojos del premio. Forman parte de un intento colectivo para completar la física de partículas partiendo del experimento, no tanto de primeros principios. Quieren avanzar explorando cómo se comporta la naturaleza, no pensando en cómo debería comportarse —un enfoque que Rosenberg tacha de «mirarse el ombligo»—. Al mismo tiempo, otros investigadores diseñan experimentos para estudiar un misterioso componente del cosmos llamado energía oscura, o para hallar indicios de ciertas unidades cuánticas bidimensionales que podrían dar lugar a nuestro universo aparentemente tridimensional.

Esos datos tal vez aporten la clave para triunfar allí donde Einstein fracasó. «Es posible que lleguemos a poner a prueba algunas de esas locas ideas sobre la evolución del universo», apunta Joshua Frieman, físico de la Universidad de Chicago. Casi seguro, dice, los físicos no lograrán formular una teoría del todo sin ellos.

EL LADO OSCURO DEL UNIVERSO

Una mirada al Experimento sobre Materia Oscura Axiónica (ADMX) de Rosenberg revela lo poderosos que pueden llegar a ser algunos instrumentos pequeños. En su búsqueda aparentemente modesta de una sola partícula, el ADMX podría despejar ciertas dudas sobre la relatividad general y, al mismo tiempo, solucionar una gran incógnita cosmológica.



Corey S. Powell es divulgador, bloguero y editor científico. Es profesor invitado en el Programa de Periodismo sobre Ciencia, Salud y Medioambiente de la Universidad de Nueva York.

El problema se remonta a los años treinta del siglo xx. En aquella época, los astrónomos se percataron de que el universo parecía estar lleno de una materia invisible cuya presencia solo podía inferirse a partir de la atracción gravitatoria que ejercía sobre las estrellas. Aquel descubrimiento se volvió aún más extraño en los años ochenta, cuando los nuevos modelos de la gran explosión mostraron que dicha materia invisible, u «oscura», no podía estar compuesta por átomos ordinarios. De modo que solo quedaban dos posibilidades: o bien a grandes escalas la gravedad no funcionaba como Einstein había predicho, o bien

TIMOTHY ARCHIBALD (*páginas anteriores*); SANDY NICHOLSON



el universo estaba impregnado de un tipo de materia que ningún telescopio podía ver.

La mayoría de los físicos rehúye la primera posibilidad, ya que la encuentran excesivamente ad hoc y, además, resulta difícil de reconciliar con los datos sobre el movimiento de las galaxias. La apuesta por la segunda opción ha dado lugar a todo tipo de experimentos para buscar las partículas invisibles que se cree que componen la materia oscura. Es aquí donde entra el ADMX.

Los axiones encajan con las propiedades que se esperan de la enigmática sustancia. Si Rosenberg y su equipo los detectan, habrán contribuido a entender mejor cómo se mueven las galaxias, cómo se formaron y evolucionaron. También habrán demostrado que no es necesario modificar las ecuaciones de Einstein. Pero, sobre todo, los axiones obligarán a revisar el modelo estándar de las partículas elementales. Este incluye todas las partículas conocidas, pero es claramente incompleto. Los axiones ayudarían a perfeccionarlo y, con ello, acercarían a los físicos a la teoría del todo.

Los axiones eran considerados hasta hace poco una posibilidad remota en lo referente a la composición de la materia oscura. La mayoría de los colegas de profesión de Rosenberg se habían decantado por la búsqueda de WIMP (siglas en inglés de «partículas masivas que interaccionan débilmente»), consideradas más atractivas desde el punto de vista teórico. Con los años, sin embargo, los detectores de WIMP han alcanzado una precisión cada vez mayor sin encontrar nada. Un punto de inflexión llegó el año pasado, con los primeros datos del experimento subterráneo LUX (uno de los más sensibles diseñados hasta la fecha), en las montañas de Dakota del Sur. El instrumento también volvió con las manos vacías.



CAZADORES DE HOLOGRAMAS

LUGAR: Fermilab, Illinois.

PROYECTO: A partir de un par de haces láser que se propagan en direcciones perpendiculares y luego se recombinan, el holómetro intenta sondear las unidades cuánticas fundamentales del espacio y el tiempo. La clase de teorías que este experimento pretende poner a prueba guardan relación con el llamado «principio holográfico», que relaciona espaciotiempo e información.

PROTAGONISTAS: (*de izquierda a derecha*) Sam Waldman, Ohkyung Kwon, Robert Lanza, Aaron Chou, Craig Hogan, Ray Tomlin, Stephen Meyer, Brittany Kamai, Lee McCuller, Jonathan Richardson, Chris Stoughton, Rainier Weiss y Richard Gustafson.



TEÓRICOS DE CUERDAS

LUGAR: Universidad Stanford, California.

PROYECTO: Los físicos de cuerdas investigan la unificación de todas las interacciones de la naturaleza a partir del postulado de que todas las partículas elementales aparecen como modos de vibración de diminutos objetos cuánticos unidimensionales, o «cuerdas». Algunas versiones de la teoría hacen predicciones sobre el origen del universo que, tal vez, podrían manifestarse en la radiación procedente de los confines del cosmos.

PROTAGONISTAS: (*de izquierda a derecha*) Andrei Linde, Renata Kallosh, Ahmed Almheiri, Leonard Susskind, Shamit Kachru, Patrick Hayden y Lampros Lamprou.

TIMOTHY ARCHIBALD

Ahora parece haber llegado el momento de la verdad para Rosenberg y su equipo, quienes esperan demostrar la existencia de los axiones y, en el proceso, apuntalar la relatividad general. La idea del experimento es muy sencilla. Las partículas de materia oscura deberían atravesar constantemente la Tierra y todo lo que hay en ella. Si se trata de axiones, de tanto en tanto estos deberían desintegrarse. Los axiones en sí no pueden detectarse por medios directos, pero en sus ocasionales desintegraciones deberían producir microondas.

«Tenemos un cilindro del tamaño de un barril de petróleo enfriado a 100 milikelvin», explica Rosenberg. Las temperaturas ultrabajas garantizan que el detector mismo no genere microondas. El instrumento se encuentra inmerso en un campo magnético que aumenta la probabilidad de que los axiones se desintegren. En su interior, una pequeña sonda del tamaño de un lápiz intenta detectar las microondas que no deberían estar allí. Sin embargo, nadie sabe exactamente qué microondas buscar. La frecuencia de la señal depende de la masa del axión, que por supuesto es desconocida.

La única posibilidad consiste en barrer todo el intervalo de frecuencias una por una, como si se tratase de sintonizar una emisora de radio. Rosenberg sonríe cuando le comento la analogía: «Siempre me interesó la radioelectrónica. De pequeño jugaba con la radio, enviando señales para que rebotasen en la Luna. Ahora usamos receptores tan sensibles que podrían asegurar la cobertura de un teléfono móvil en Marte». También se siente orgulloso de que, al contrario que las divagaciones de Einstein sobre el campo unificado, el ADMX arrojará una respuesta concreta.



«En 2018 habremos finalizado la búsqueda en todas las frecuencias», asegura el investigador. «En ese momento, el axión estará ahí o no». En otras palabras, si no dan con una gran pista para llegar a la teoría del todo, tendrán una idea más que tachar del catálogo.

LA ENERGÍA DEL ESPACIO VACÍO

Mientras Rosenberg se ocupa de la materia oscura, otros investigadores buscan completar la física conocida estudiando otro de los misterios invisibles del universo: la energía oscura. En cierto sentido, esta es lo contrario de la materia oscura: en lugar de generar una atracción gravitatoria, produce una especie de repulsión. Dado que sus efectos se oponen a los de la gravedad, la energía oscura tiene implicaciones directas sobre la manera de interpretar las ecuaciones de Einstein. Además, no admite explicación dentro del modelo actual de física de partículas, por lo que su estudio constituye un elemento crítico para cualquier teoría que aspire a explicarlo todo.

A ello se dedica Frieman, de la Universidad de Chicago. Para ello emplea una cámara instalada en el telescopio Blanco, en lo alto del cerro Tololo, un pico chileno situado a más de dos kilómetros sobre el nivel del mar. El instrumento captará un gran número de fotografías de galaxias distantes. Cada una ocupará 570 megapíxeles, una enorme cantidad de datos. El proyecto, bautizado como Sondeo de la Energía Oscura (DES, por sus siglas en inglés), tomará 400 fotografías cada noche, 105 noches al año durante un total de cinco años. Cuando concluya, en febrero de 2018, habrá examinado más de 300 millones de galaxias y más de 4000 explosiones de supernova. (A modo de comparación, el gran sondeo automatizado realizado en la Universidad de California en Berkeley entre 1998 y 2000 registró un total de 96 supernovas.)

Al igual que Rosenberg, Frieman comenzó su carrera como teórico, pero acabó dedicándose al trabajo observacional seducido por la idea de poner a prueba las hipótesis. Ahora debe enfrentarse a las dificultades de la tarea. «Tomar datos es complicado», admite. «Procesarlos también.»

Frieman y su equipo analizan las observaciones de cuatro maneras, cada una de ellas diseñada para estudiar una faceta concreta de la energía oscura. Una examina cierta clase de explosiones estelares conocidas como supernovas de tipo Ia. Sus propiedades las convierten en jalones cósmicos ideales para estudiar cómo ha evolucionado la expansión del universo: su brillo aparente (cuánta luz llega a la Tierra) indica cuán lejos están, mientras que su color permite deducir a qué velocidad se alejan. Los otros tres tipos de análisis estudiarán el agrupamiento de las galaxias. La gravedad tiende a juntarlas; la energía oscura, a separarlas. Por tanto, examinar cómo ha cambiado la distribución de galaxias a lo largo de las distintas épocas cósmicas revela con qué intensidad ha estado actuando la energía oscura en cada momento.

Los modelos más sencillos de energía oscura suponen que esta constituye una propiedad ubicua y eterna del espacio vacío. De hecho, las teorías ordinarias de partículas contemplan este tipo de energía, pero predicen un valor 10^{120} veces mayor del observado, un cálculo que ha sido calificado como «la peor predicción de toda la física». Explicar su verdadero valor, sorprendentemente pequeño, plantea uno de los mayores retos a cualquier teoría del todo. Tampoco se sabe si la energía oscura es constante. Si Frieman descubriese que cambia con el tiempo, sería otro aspecto más que cualquier teoría unificada debería explicar.

Por extrañas que parezcan, la materia y la energía oscuras pueden entenderse como pequeños añadidos a un tipo de realidad que Einstein aún habría reconocido

Pero hay puntos más básicos aún por aclarar. «Estamos suponiendo que la energía oscura es lo que produce la expansión acelerada del universo, pero no estamos completamente seguros de que sea así. Tal vez a escalas muy grandes la relatividad general no describa de manera correcta la gravedad», observa Frieman. Una modificación de la teoría de Einstein podría imitar los efectos de la energía oscura. En cualquier caso, ha de existir una teoría que vaya más allá de la relatividad general, y los resultados del DES ayudarán a encontrarla.

¿VIVIMOS EN UN HOLOGRAMA?

Por extrañas que parezcan, la materia y la energía oscuras pueden entenderse como pequeños añadidos a un universo que nos es familiar: un recubrimiento de nuevas partículas y campos sobre un tipo de realidad que Einstein aún habría reconocido. Pero ¿y si fuese necesario introducir cambios más profundos en las teorías físicas? ¿Qué ocurriría si el espaciotiempo tuviese propiedades imposibles de describir mediante la relatividad general?

Craig Hogan, director del Centro de Astrofísica de Partículas del Fermilab, cerca de Chicago, explora una de esas ideas con un experimento que denomina «holómetro». Hogan pretende averiguar si el espacio y el tiempo se componen de unidades fundamentales, a modo de tictacs y marcas de regla. Según la clase de teorías que intenta poner a prueba, nuestro familiar espacio tridimensional no sería más que una ilusión. Si pudiésemos examinarlo a distancias muy cortas (billones de billones de veces menores que un átomo) observaríamos una serie de píxeles bidimensionales que solo aparentarían tener tres dimensiones vistos desde lejos.

Cada una de esas unidades básicas sería cuántica, por lo que su posición mostraría una indeterminación intrínseca. A escalas macroscópicas, el espaciotiempo parecería continuo, tal y como lo concibió Einstein, pero en última instancia sería cuántico. Semejante universo pixelado compatibilizaría la mecánica cuántica y la relatividad general, salvando así uno de los grandes escollos para formular una teoría unificada. La idea de que nuestra realidad tridimensional pudiese emerger a partir de una estructura de dos dimensiones se conoce como principio holográfico, de ahí el nombre del experimento. (El término hace también referencia a un instrumento del siglo xvi diseñado para medir ángulos sobre el horizonte con gran precisión.)

El holómetro de Hogan ya ha comenzado a tomar datos. Consta de un rayo láser que se divide en dos haces, cada uno de los cuales sigue su propio camino para reflejarse en un espejo y recombinarse después. Si la estructura última del espacio es cuántica, la indeterminación en la posición de cada rayo debería crear pequeñas vibraciones en el dispositivo, lo que desplazaría los haces y haría que al recombinarse no estuviesen perfectamente sincronizados. En principio, el holómetro de Hogan debería detectar vibraciones en la escala del attómetro: 10^{-18} metros.

Pero la estructura cuántica del espacio tal vez sea mucho menor. Varios físicos han alertado a Hogan de que su instrumento bien podría no detectar nada. Él ha tomado su escepticismo como un reto. Mientras hablamos, parece deleitarse con la profunda irritación que su experimento despierta en Leonard Susskind, físico teórico de Stanford y uno de los padres del principio holográfico. «Lenny tiene una idea de cómo funciona el principio holográfico, y no es la misma que la nuestra. Está convencido de que no vamos a ver nada. En una conferencia el año pasado llegó a decir que se cortaría el cuello si detectábamos algo», recuerda Hogan.

La disputa debería resolverse pronto. Hogan cree que la respuesta podría llegar en un año. Entonces algo pasará: «Tanto si detectamos algo como si no, vamos a reducir el número de ideas viables. Nadie sabe qué demonios esperar», concluye el investigador.

LA CONTINUACIÓN DEL SUEÑO DE EINSTEIN

Tras los comentarios de Hogan, estaba deseando hablar con Susskind para escuchar su versión. Lejos del estereotipo de físico teórico pensativo y cegado por las matemáticas, Susskind se lanza enseguida a discutir sobre conceptos que pueden ponerse a prueba. «La gente se queja de que la física teórica se está volviendo frívola, llena de ideas que no pueden refutarse. Tonterías. Todos tenemos presente la importancia de la falsabilidad», asegura. Pero, si hay un experimento de laboratorio adecuado para ello, dice Susskind, ese no es el holómetro.

Según él, una apuesta más segura consistiría en explorar los confines del universo para buscar indicios a favor de la teoría de cuerdas. Esta postula que todas las partículas aparecen como modos de vibración de diminutos objetos unidimensionales, o «cuerdas», lo que en cierto sentido ya supone una unificación. También hace predicciones sobre las condiciones físicas que imperaron en la gran explosión. Y algunas versiones —en las que trabaja Susskind— se remontan incluso a antes de ese momento. Susskind cree que los astrónomos podrían ver indicios de esa existencia previa del universo en la radiación procedente de los confines del cosmos.

Con todo, el investigador opina que lo más probable es que las pistas hacia una teoría unificada no vengan de las observaciones, sino de la exploración matemática de las propiedades del espaciotiempo y los agujeros negros. «En los próximos diez años veremos avances importantes», predice Susskind. «No digo que vayamos a encontrar la teoría del todo; ni siquiera estamos cerca. Pero habrá hallazgos considerables en lo referente a la conexión entre gravedad y mecánica cuántica.»

Cuando ese nexo se desvele, Susskind —al igual que la mayoría de sus colegas teóricos— cree que será la mecánica cuántica la que obligará a la gravedad a seguir sus reglas. Pero, ya que Einstein fue quien comenzó a andar este camino, parece justo dar la última palabra a uno de los einstenianos más destacados: el físico Lee Smolin, del Instituto Perimeter de Física Teórica, en Ontario.

Smolin está convencido de que muchos de sus compañeros obsesionados con la mecánica cuántica adolecen de miras demasiado estrechas en su búsqueda de la teoría del todo. «La mecánica cuántica solo tiene sentido como descripción de un

RELATIVISTAS CUÁNTICOS

LUGAR: Instituto Perimeter de Física Teórica, Ontario.

PROYECTO: Algunos físicos han explorado la posibilidad de reemplazar la relatividad del tiempo característica de la teoría de Einstein por una «relatividad del tamaño». Ello conduce a una reformulación de la relatividad general en la que tiempo y la forma están bien definidos, pero no así el concepto de tamaño.

PROTAGONISTAS: (*fila trasera, de derecha a izquierda*) Daniel Carrasco Guariento, Gabriel Herczeg, Flavio Mercati, Sean Gryb y Hamish Forbes; (*primera fila, de derecha a izquierda*) Niall Ó Murchadha, Henrique Gomes, Andrea Napoletano, Julian Barbour y Lee Smolin.



SANDY NICHOLSON

subsistema», sostiene. «Pero la relatividad general no atañe a un subsistema. Es la descripción del universo como un sistema cerrado.» Si queremos entender el universo como un todo, asegura, hemos de verlo como hizo Einstein, desde una perspectiva relativista.

Ese enfoque ha llevado a Smolin a la sorprendente hipótesis de que las leyes de la física podrían evolucionar con el tiempo y de que el universo guarda memoria de su propia historia, lo que él llama «principio de precedencia». De esta forma, propone ir más allá de los detalles que la mecánica cuántica no acaba de explicar (la masa de esta partícula o la intensidad de aquella interacción) y considerarlos como aspectos del desarrollo de un único sistema cerrado: el universo. Smolin tiene incluso una idea sobre cómo poner a prueba tal hipótesis.

«Si pudiésemos hacer evolucionar un sistema grande y complejo, pero aun así descrito por un estado cuántico puro, obligaríamos a la naturaleza a inventar una nueva sistemática. Algo así podría llevarse a cabo con dispositivos cuánticos», apunta. Después de crear el mismo sistema una y otra vez en el laboratorio, la naturaleza podría empezar a desarrollar una preferencia por un estado cuántico determinado. «Sería difícil de distinguirlo del ruido de fondo del experimento, pero no imposible.»

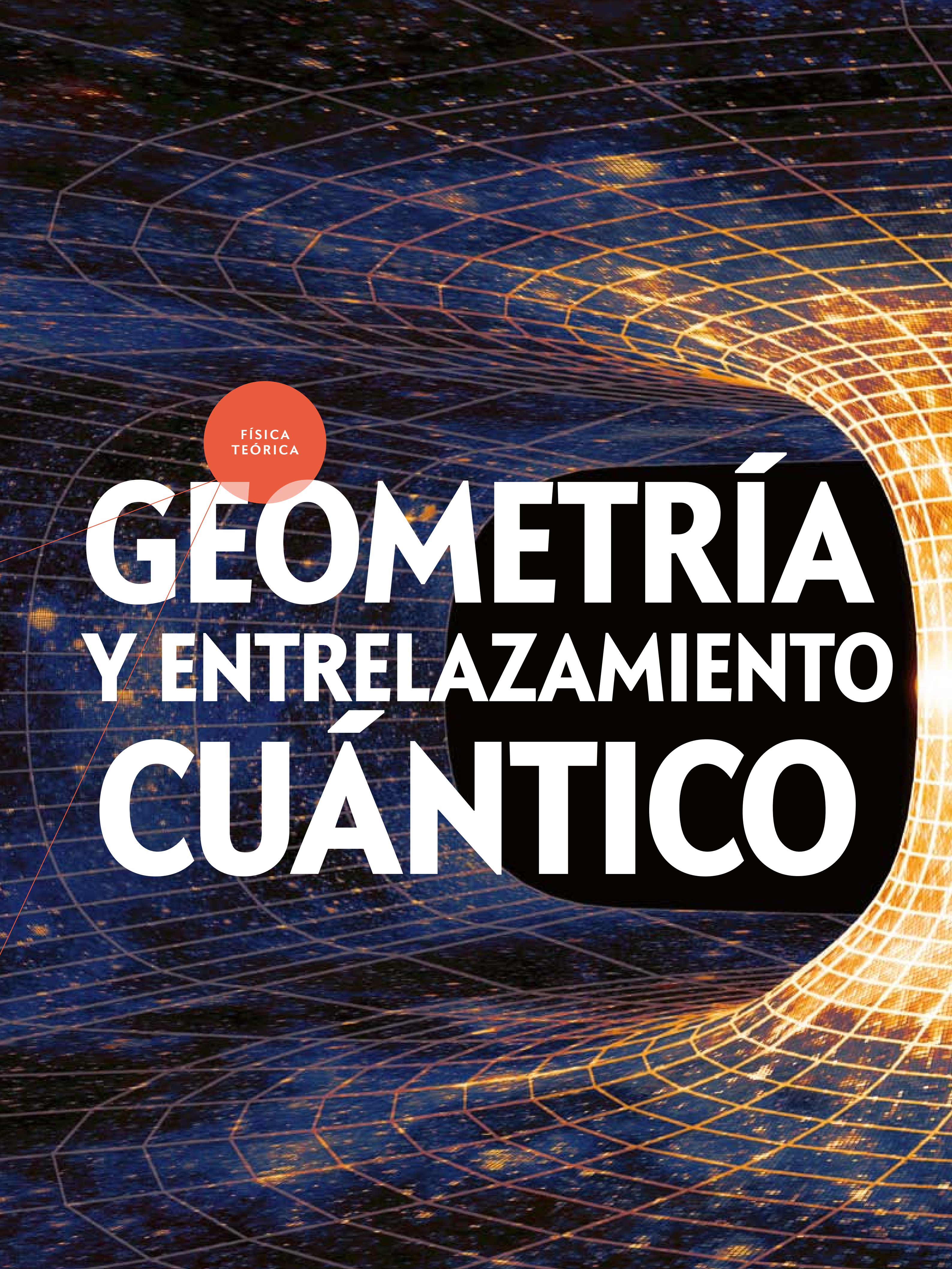
Smolin intenta no sonar místico, pero en cierto sentido no parece estar hablando del universo, sino del espíritu de Einstein. Hace ahora un siglo, un solo hombre halló una nueva manera de pensar sobre el universo. Cuarenta años después ese hombre murió, pero sus ideas dejaron una huella inconfundible en los investigadores, que hoy siguen realizando experimentos al servicio de un antiguo ideal. El impulso parece imparable, mientras unos y otros siguen recapitulando su búsqueda en pos de una verdad cada vez más profunda.

PARA SABER MÁS

Search for hidden sector photons with ADMX detector. A. Wagner et al. en *Physical Review Letters*, vol. 105, n.º 17, art. 171.801, 19 de octubre de 2010.
Time reborn: From the crisis in physics to the future of the universe. Lee Smolin. Houghton Mifflin Harcourt, 2013.
Mass and galaxy distributions of four massive galaxy clusters from Dark Energy Survey science verification data. P. Melchior et al. en *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, vol. 449, n.º 3, págs. 2219-2238, 21 de mayo de 2015.

EN NUESTRO ARCHIVO

La información en el universo holográfico. Jacob D. Bekenstein en *IyC*, octubre de 2003.
Átomos del espacio y del tiempo. Lee Smolin en *IyC*, marzo de 2004.
La constante cosmológica. Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner en *IyC*, noviembre de 2004.
¿Es digital el espacio? Michael Moyer en *IyC*, abril de 2012.
Tras el rastro de los axiones. Joerg Jaeckel, Axel Lindner y Andreas Ringwald en *IyC*, marzo de 2015.



FÍSICA TEÓRICA

GEOMETRÍA Y ENTRELAZAMIENTO CUÁNTICO



El extraño fenómeno cuántico que tanto inquietaba a Einstein podría explicar la continuidad del espacio y el tiempo

Juan Martín Maldacena

Juan Maldacena es físico teórico del Instituto de Estudios Avanzados de Princeton. Ha destacado por sus contribuciones al estudio de la gravedad cuántica y la teoría de cuerdas. En 2012 recibió el Premio de Física Fundamental de la Fundación Milner.



A principios del siglo XX hubo dos revoluciones en física: la mecánica cuántica y la relatividad general. La mecánica cuántica nos enseñó las leyes que rigen el comportamiento del mundo microscópico. La relatividad general, formulada en 1915 por Albert Einstein, es una teoría del espacio y el tiempo. Según ella, el espaciotiempo es curvo y posee una dinámica propia.

Hasta ahora todas las predicciones de ambas teorías se han visto confirmadas por los experimentos. Sin embargo, solemos aplicar una y otra a fenómenos muy distintos. Acostumbramos a emplear la mecánica cuántica para describir el comportamiento de objetos extremadamente pequeños (como átomos o fotones), mientras que usamos la relatividad general para estudiar cómo cambia la geometría del espaciotiempo en presencia de cuerpos muy masivos (estrellas o galaxias, por ejemplo). Para investigar sistemas físicos muy pequeños y masivos, como el universo pocos instantes después de la gran explosión, necesitaríamos disponer de una descripción cuántica del espaciotiempo. Cien años después de que Einstein formulase su teoría, este sigue siendo uno de los mayores retos a los que se enfrenta la física fundamental.

Hace dos años, motivados por un debate reciente relacionado con las propiedades de los agujeros negros, el físico de Stanford Leonard Susskind y el autor de este artículo propusimos una conexión entre dos fenómenos aparentemente paradójicos que ocurren en mecánica cuántica y en relatividad general: el entrelazamiento cuántico y los agujeros de gusano. El primero hace referencia a un tipo de correlación cuántica que puede existir entre dos sistemas físicos distantes. Los agujeros de gusano son «atajos» que aparecen en algunas soluciones de las ecuaciones de Einstein y que conectan regiones muy lejanas del espacio.

A continuación veremos que ambos fenómenos están relacionados. La equivalencia entre ellos puede argumentarse con solidez para algunos casos concretos en los que intervienen agujeros negros, pero parece ser más general. Nuestra idea es que esta relación entre geometría y entrelazamiento tal vez constituya un principio que toda teoría cuántica del espaciotiempo, o de gravedad cuántica, debería obedecer. Dicho principio tiene consecuencias profundas. Sugiere que, de alguna forma, el espaciotiempo mismo podría emerger a partir del entrelazamiento cuántico de constituyentes microscópicos más fundamentales.

Curiosamente, tanto el entrelazamiento cuántico como los agujeros de gusano se remontan a dos artículos que el propio Einstein escribió en 1935. Ambos trabajos parecen tratar sobre fenómenos muy distintos, y seguramente Einstein nunca sospechó que pudiese haber una conexión entre ellos. De hecho, el entrelazamiento era una propiedad de la mecánica cuántica que molestaba enormemente al físico alemán. En lo que sigue repasaremos ambos artículos y explicaremos su relación desde un punto de vista moderno.

AGUJEROS NEGROS Y AGUJEROS DE GUSANO

Una predicción sorprendente de la teoría de Einstein son los agujeros negros. Estos objetos se forman cuando una gran cantidad de materia se concentra en una región pequeña del espacio. La materia no tiene por qué ser especial; por ejemplo, podríamos crear un agujero negro con aire. Eso sí, necesitaríamos mucho aire: tendríamos que llenar una esfera del tamaño del sistema solar. Pero, si lo hiciéramos, el sistema colapsaría bajo su propio peso y se comprimiría hasta formar un agujero negro.

Todo agujero negro se encuentra rodeado por una superficie imaginaria llamada horizonte de sucesos. Decimos que es imaginaria porque un astronauta que cayese libremente no encontraría nada allí. Sin embargo, una vez que la atravesase, no podría dar la vuelta atrás. Entraría en una región donde el espacio está colapsando hacia una «singularidad», una zona donde la geometría se contrae por completo. Al acercarse a la singularidad, el astronauta moriría despedazado por las fuerzas gravitatorias.

Fuera de la región donde se encuentra la materia, un agujero negro queda descrito por una solución de las ecuaciones de

EN SÍNTESIS

Según la relatividad general, la materia y la energía cambian la geometría del espacio. Cien años después de que Einstein formulase su teoría, los físicos siguen buscando una descripción cuántica del espacio y el tiempo.

La mecánica cuántica y la relatividad general predicen dos fenómenos que parecen permitir la transmisión instantánea de información: el entrelazamiento cuántico y los agujeros de gusano. Ambos fueron estudiados por Einstein en 1935.

Varios trabajos recientes han demostrado que dichos fenómenos están relacionados: el entrelazamiento puede originar una conexión geométrica entre regiones distantes del espacio. La idea sugiere un nuevo principio en gravedad cuántica.

Einstein que fue descubierta en 1916 por el físico Karl Schwarzschild. La motivación original de Schwarzschild era encontrar el campo gravitatorio generado por una masa puntual. De hecho, su solución no contiene materia: todo lo que describe es un campo gravitatorio puro con simetría esférica. Aunque puede parecer una configuración simple, las propiedades de este espaciotiempo resultaron bastante difíciles de interpretar. Una comprensión razonable de su estructura completa no llegó hasta los años sesenta.

En 1935, en uno de los artículos a los que aludíamos más arriba, Einstein y Nathan Rosen, uno de sus colaboradores en el Instituto de Estudios Avanzados de Princeton, descubrieron un aspecto muy curioso de la solución de Schwarzschild. Hallaron que esta contiene dos espacios independientes unidos por una especie de «tubo». A un instante de tiempo fijo, la geometría puede visualizarse de la siguiente manera: muy lejos de la región central, el espacio es plano (sin curvatura apreciable); pero, a medida que nos acercamos al centro, la geometría se deforma y se conecta con un segundo espacio que también es asintóticamente plano.

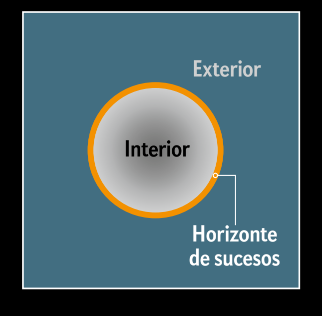
La conexión geométrica que acabamos de describir recibe el nombre de «puente de Einstein y Rosen» (ER), o agujero de gusano. Ellos analizaron la geometría de una hipersuperficie a un tiempo fijo (es decir, un espacio curvo de tres dimensiones) años antes de que se entendiera la estructura completa de la solución de Schwarzschild. Su motivación era encontrar una descripción geométrica de las partículas elementales que no fuera singular. Hoy creemos que su interpretación era desacertada.

El puente original de ER une dos espacios independientes. Sin embargo, resulta posible encontrar geometrías similares en las que las dos regiones conectadas pertenecen al mismo espacio. Con algunas pequeñas modificaciones, la solución de Schwarzschild puede también interpretarse como una que contiene dos agujeros negros muy distantes unidos a través de su interior. Imagine que tenemos un agujero negro aquí y otro en una galaxia lejana. Un observador, a quien llamaremos Romeo, está parado a un metro del horizonte de sucesos del primer agujero negro, mientras que Julieta se encuentra a un metro del horizonte del segundo. Si los interiores de ambos agujeros negros están conectados por un puente de ER, la distancia entre Romeo y Julieta a través del agujero de gusano será solo de dos metros, con independencia de cuán lejos se hallen en el espacio ambiente.

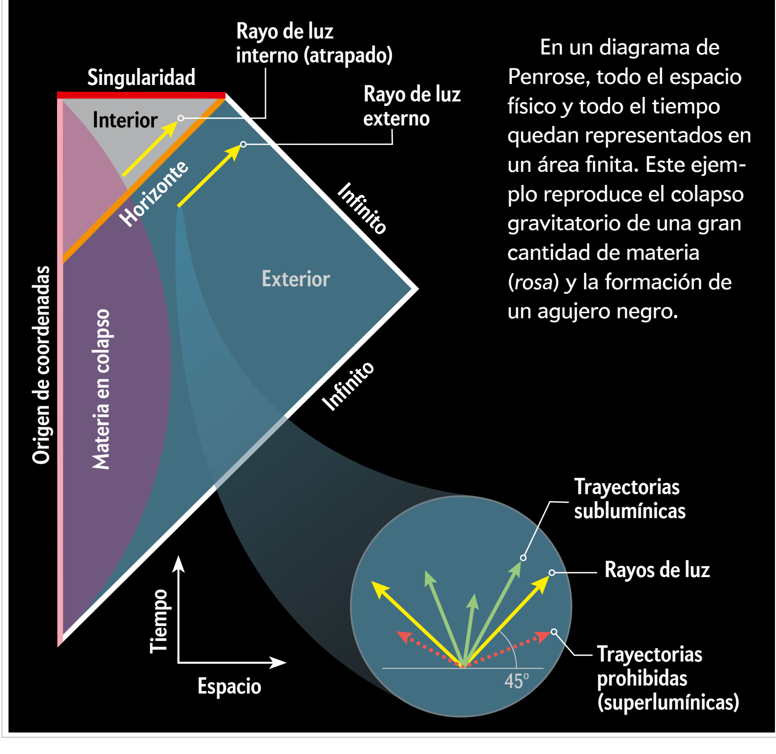
DIAGRAMAS DE PENROSE

Causa y efecto en un agujero negro

Los agujeros negros (*derecha*) se forman cuando una gran cantidad de materia se concentra en una región del espacio lo suficientemente pequeña. En tal caso, el campo gravitatorio en la región que rodea a la materia se torna tan intenso que nada, ni siquiera la luz, puede escapar de allí. La superficie a partir de la cual resulta imposible dar la vuelta atrás recibe el nombre de horizonte de sucesos (*naranja*). Todo objeto que traspase el horizonte caerá inevitablemente hacia una singularidad: una zona en la que la curvatura del espacio se torna infinita (*rojo, abajo*).



La estructura causal de un agujero negro suele representarse mediante un «diagrama de Penrose» (*abajo*). En estos diagramas el eje vertical corresponde al tiempo y el horizontal a la coordenada radial (las otras dos direcciones del espacio se omiten). La escala en cada punto se elige de tal manera que los rayos de luz describan siempre líneas rectas a 45 grados. Todas las trayectorias físicas transcurren necesariamente en el interior de estos «conos de luz». Por tanto, un suceso que ocurra en una posición e instante determinados solo podrá afectar a los puntos incluidos en el interior de su cono de luz futuro.



En un diagrama de Penrose, todo el espacio físico y todo el tiempo quedan representados en un área finita. Este ejemplo reproduce el colapso gravitatorio de una gran cantidad de materia (*rosa*) y la formación de un agujero negro.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

Tales geometrías parecen problemáticas. Recordemos que uno de los principios de la relatividad especial es la imposibilidad de enviar señales más rápido que la luz. Sin embargo, se diría que los agujeros de gusano nos permiten violar este principio, ya que podríamos emplearlos para mandar señales a través de ellos. No obstante, en 1962, Robert W. Fuller, de la Universidad de Columbia, y John A. Wheeler, de la de Princeton, demostraron que los puentes de ER no pueden usarse para enviar señales de ningún tipo. Ello se debe a que se trata de geometrías dinámicas en las que el tiempo desempeña un papel importante. Nuestros agujeros de gusano describen la geometría del espacio a un instante de tiempo fijo. Sin embargo, dicha geometría evoluciona con el tiempo. Fuller y Wheeler demostraron que un puente de ER siempre acaba «estirándose»

Universos distantes y agujeros de gusano

En 1916, Karl Schwarzschild publicó una solución de las ecuaciones de Einstein correspondiente a un campo gravitacional puro con simetría esférica. Dicha solución no contiene materia; representa un caso idealizado en el que solo hay campo gravitatorio. Más tarde se vio que este describía una singularidad y un horizonte de sucesos; es decir, un agujero negro. Sin embargo, el espaciotiempo de Schwarzschild esconde una estructura mucho más rica. A continuación se indican sus principales características a partir de su diagrama de Penrose.

Singularidad futura y pasada

El espaciotiempo completo asociado a la solución de Schwarzschild incluye dos singularidades: una en el futuro distante y otra en el pasado remoto. En otras palabras, hay una región donde el espacio está colapsando hacia una singularidad (un agujero negro) y otra en la que el espacio está «saliendo», como si se tratase de una gran explosión. Cada una de estas regiones se encuentra rodeada por su propio horizonte de sucesos.

Singularidad futura
Interior futuro
Horizonte
Horizonte
Exterior II
Exterior I
Interior pasado
Singularidad pasada
Tiempo
Espacio

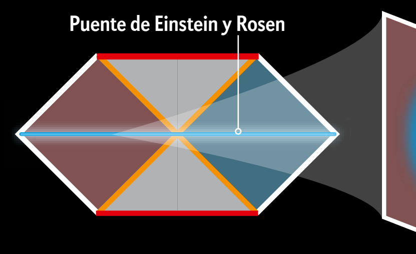
Diagrama de Penrose del espaciotiempo de Schwarzschild

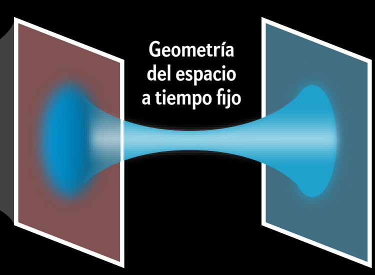
Universos disconexos

Fuera de los horizontes de sucesos, la solución completa de Schwarzschild describe dos espacios independientes. Los rayos de luz no pueden cruzar de uno a otro, por lo que nada de lo que ocurra en una de esas zonas podrá afectar a la otra.

Agujeros de gusano

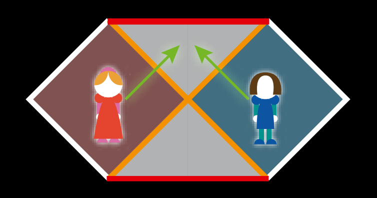
En 1935, Einstein y Nathan Rosen descubrieron que la solución de Schwarzschild contenía una geometría suave (*línea azul, izquierda*) que conectaba dos espacios distintos. Este «puente», o agujero de gusano, describe la geometría del espacio en un instante de tiempo fijo (*derecha*). No puede atravesarse, ya que para ello sería necesario viajar más rápido que la luz.





Agujeros negros conectados

Imaginemos dos observadores, Romeo y Julieta, uno en cada espacio exterior. Cada uno de ellos verá un horizonte de sucesos; es decir, un agujero negro. Aunque las regiones externas pertenecen a universos distintos, los dos agujeros negros comparten el interior, por lo que Romeo y Julieta podrían encontrarse allí.



Solución idealizada

La solución de Schwarzschild describe un caso de gran interés teórico, pero no se aplica a los agujeros negros del mundo real. Estos últimos se forman por el colapso de materia, lo que modifica la geometría de la solución. Un agujero negro astrofísico solo corresponde a una parte de la geometría de Schwarzschild; en particular, no contiene agujeros de gusano que conecten con otros espacios.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA, SEGÚN EL AUTOR

—su longitud se hace infinita— antes de que a un observador le dé tiempo a cruzarlo. Esto supone una decepción para los personajes de las películas de ciencia ficción, que suelen emplear los agujeros de gusano para cruzar el universo a velocidades superlumínicas.

En el caso de dos agujeros negros conectados a través de su interior por un agujero de gusano, los horizontes se tocan por un instante, pero luego se separan tan rápido que resulta imposible cruzar el puente y llegar al otro lado. De manera que, si Romeo tratase de enviar un mensaje superlumínico a Julieta, no podría. Lanzaría un cohete con el mensaje hacia su agujero negro y la nave caería en el interior. Pero, una vez dentro, los dos horizontes se separarían a toda velocidad y el espacio colapsaría mucho antes de que el mensaje pudiese llegar al horizonte de Julieta.

Sin embargo, Romeo y Julieta aún tendrían una oportunidad para verse. Podrían dejarse caer en sus respectivos agujeros negros y encontrarse en el interior. Pero hay un problema: una vez dentro, jamás podrían salir, por lo que morirían en la singularidad. Se trataría literalmente de un caso de «atracción fatal». Lo extraño de esta geometría es que describe dos agujeros negros que comparten el interior. Por eso Romeo y Julieta pueden encontrarse allí.

Hemos de enfatizar que nuestros agujeros de gusano son muy distintos de los que aparecen en las películas de ciencia ficción. Estos últimos (aquellos que sí podrían atravesarse) requieren un tipo de materia con energía negativa que no parece ser compatible con las leyes de la física tal y como las conocemos. Por eso, muchos físicos creemos que los agujeros de gusano de la ciencia ficción no pueden existir en la naturaleza.

Otro matiz importante atañe a la clase de agujeros negros que estamos considerando aquí. Los agujeros negros que se forman por el colapso de materia solo corresponden a una porción de la geometría completa de Schwarzschild, ya que la presencia

de materia modifica la solución. Este caso se entiende muy bien y en él no hay ningún agujero de gusano. Los agujeros negros que se producen por medio de procesos astrofísicos naturales, como el colapso de estrellas, son de este tipo y no contienen agujeros de gusano que los conecten con otras regiones del espacio ni entre sí, como ocurre en la solución completa de Schwarzschild. Sin embargo, nos gustaría entender mejor la interpretación física del espaciotiempo de Schwarzschild. Después de todo, se trata de una de las soluciones más sencillas de las ecuaciones de Einstein.

CORRELACIONES CUÁNTICAS

De manera sorprendente, la interpretación de la solución de Schwarzschild parece tener que ver con el otro artículo de Einstein que mencionábamos al principio. Este trabajo es hoy muy famoso e influyente. Fue escrito el mismo año junto con Rosen y Boris Podolski, también investigador del Instituto de Estudios Avanzados. Los autores (hoy conocidos por sus iniciales, EPR) mostraron que la mecánica cuántica permite la existencia de extrañas correlaciones entre sistemas físicos lejanos, una propiedad que más tarde sería llamada «entrelazamiento».

Las correlaciones entre objetos distantes también se dan en los sistemas clásicos. Imagine que usted sale de casa con un solo guante porque olvidó el otro en casa. Antes de mirar en su bolsillo, no podrá saber qué guante tomó. Pero, una vez lo haga y vea que tiene el guante derecho, sabrá de inmediato que el que está en su casa es el izquierdo.

Sin embargo, el entrelazamiento implica correlaciones entre variables cuánticas, las cuales pueden estar sujetas al principio de incertidumbre de Heisenberg. Este nos dice que hay pares de variables físicas que no pueden conocerse con total precisión al mismo tiempo. El ejemplo más famoso es el de la posición y la velocidad de una partícula: si medimos muy bien su posición, la velocidad se tornará incierta, y viceversa. En su artículo, EPR se preguntaron qué ocurriría si tenemos dos sistemas distantes y en cada uno de ellos decidimos medir un par de variables sujetas al principio de incertidumbre.

El ejemplo analizado por EPR consideraba dos partículas con la misma masa que se mueven en una sola dimensión. Llamemos a estas partículas *R* y *J* y preparémoslas de tal manera que su centro de masas tenga una posición bien definida, digamos $x_{cm} = x_R + x_J = 0$. También podemos hacer que su velocidad relativa, $v_{rel} = v_R - v_J$, tome un valor preciso; por ejemplo, $v_{rel} = v_0$. Antes de continuar, clarifiquemos algo. Aquí estamos especificando una posición y una velocidad de manera exacta. ¿No viola esto el principio de incertidumbre de Heisenberg? Recordemos que este se aplica a la posición de un sistema y a la velocidad asociada a dicha posición. Pero, si tenemos dos sistemas distintos, nada nos impide conocer la posición del primero y la velocidad del segundo. En nuestro ejemplo no estamos determinando la posición y la velocidad del centro de masas, sino la posición del centro de masas y la velocidad relativa de las partículas. Dado que ambas cantidades son independientes, no hay ningún problema en considerar un estado inicial como el que postularon EPR.

Ahora vayamos a la parte más sorprendente. Supongamos que nuestras partículas se encuentran muy alejadas una de otra y que dos observadores distantes, Romeo y Julieta, deciden medir sus posiciones. Ahora bien, debido a cómo han sido preparadas, si Julieta obtiene el valor x_J, entonces Romeo encontrará que su partícula está en $x_R = -x_J$. Por otro lado, si los dos miden la velocidad y Julieta obtiene el resultado v_J, Romeo hallará con toda seguridad el valor $v_R = v_0 + v_J$. Por supuesto, Romeo y Julieta son libres de elegir qué variable van a medir. Sin embargo, si Julieta mide la posición y Romeo la velocidad, sus resultados serán completamente aleatorios y no mostrarán correlación alguna.

Lo extraño es que, si Julieta decide medir la posición de su partícula, la de Romeo tendrá una posición completamente determinada una vez que sepamos el resultado de la medición de Julieta. Y lo mismo ocurrirá con la velocidad. Podríamos pensar que, cuando Julieta mide la posición, la partícula de Romeo «sabe» inmediatamente que debe tener una posición bien definida. A primera vista esto parece constituir una transmisión instantánea de información: al repetir el mismo experimento un gran número de veces, Julieta podría enviar a Romeo un mensaje de ceros y unos decidiendo medir la posición o la velocidad de su partícula. Sin embargo, Romeo no sería capaz de leer ese mensaje a menos que conociese el resultado de las mediciones de Julieta. Así pues, las correlaciones debidas al entrelazamiento cuántico no pueden usarse para enviar señales superlumínicas.

El entrelazamiento tal vez parezca una propiedad muy esotérica de los sistemas cuánticos, pero a lo largo de los años ha sido confirmado en numerosos experimentos. En las últimas dos décadas, las correlaciones cuánticas han dado lugar a varias aplicaciones prácticas y a grandes avances en disciplinas como la criptografía y la información cuánticas.

ER = EPR

Ahora retornemos a los agujeros negros. En 1974, Stephen Hawking demostró que los efectos cuánticos causan que los agujeros negros emitan radiación del mismo modo en que lo hace un cuerpo caliente. Ello implica que los agujeros negros tienen asociada una temperatura. Dicha temperatura resulta ser mayor cuanto más pequeño es el objeto. De hecho, un agujero negro puede ser blanco. En concreto, uno del tamaño de una bacteria, con un radio similar a la longitud de onda de la luz visible, se vería blanco debido a la radiación de Hawking. No emitiría mucha luz, pero desde cerca lo veríamos como un pequeño punto brillante. Con todo, la masa de un agujero negro de ese tamaño seguiría siendo enorme, equiparable a la de un continente, por lo que no cabría usarlo como fuente de energía.

En los agujeros negros que se producen de forma natural por el colapso de estrellas, la radiación de Hawking es tan débil que, en la práctica, resulta inobservable. Estos objetos son demasiado grandes y se encuentran demasiado fríos para apreciar dicho efecto. Sin embargo, el hecho de que los agujeros negros tengan asociada una temperatura acarrea importantes consecuencias.

Sabemos desde el siglo XIX que la temperatura se debe al movimiento de los constituyentes microscópicos de un sistema. En un gas, por ejemplo, aparece como consecuencia de la agitación de sus moléculas. Por tanto, cabe esperar que un agujero negro cuente con algún tipo de constituyentes microscópicos capaces de adoptar un gran número de configuraciones posibles, o «microestados». También creemos que, al menos vistos desde el exterior, los agujeros negros deberían comportarse como sistemas cuánticos ordinarios sujetos a todas las leyes de la mecánica y la termodinámica.

En vista de lo anterior, nada nos impide considerar estados entrelazados de agujeros negros. Imaginemos un par de agujeros negros muy distantes, cada uno con un gran número de microestados. Podemos pensar en una configuración en la que cada microestado del primer agujero negro se halla correlacionado

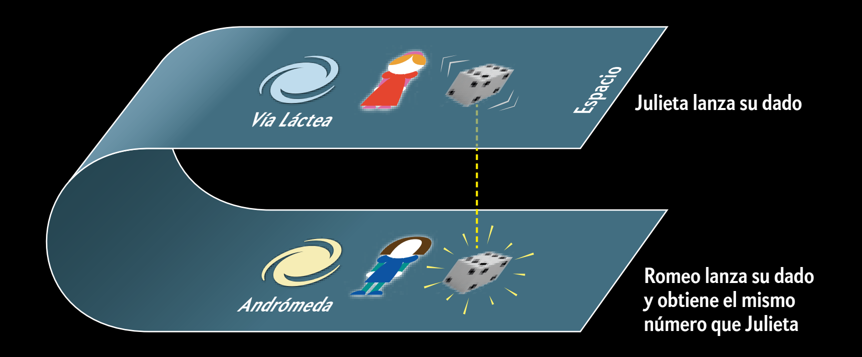
El pegamento cuántico del espaciotiempo

Uno de los fenómenos menos intuitivos predichos por la mecánica cuántica es el entrelazamiento. En él, las medidas efectuadas sobre dos sistemas cuánticos distantes parecen coordinarse de manera instantánea (*arriba*). En 1935, Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen analizaron las implicaciones de este fenómeno en un artículo hoy célebre.

Varias investigaciones recientes han demostrado que el entrelazamiento cuántico puede originar una conexión geométrica entre regiones distantes del espacio (*abajo*). Este resultado sugiere un principio general en gravedad cuántica. El espaciotiempo podría emerger a partir de las correlaciones cuánticas de sus constituyentes microscópicos fundamentales.

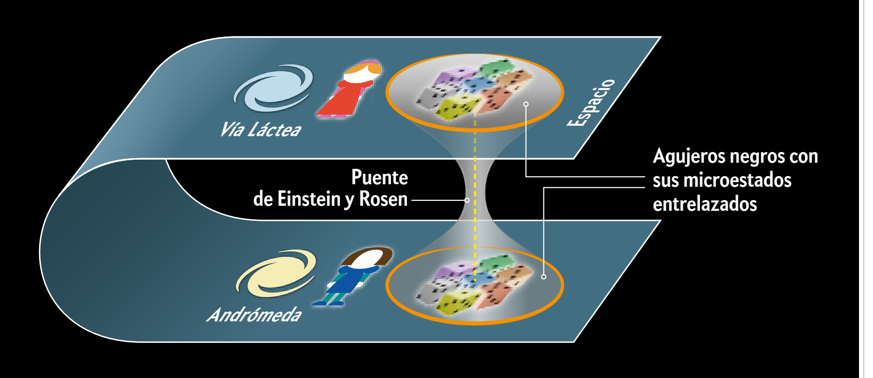
Entrelazamiento cuántico

Dos partículas entrelazadas pueden verse como dos dados que arrojan siempre el mismo resultado. Cada vez que Julieta lance su dado obtendrá un número aleatorio. Sin embargo, su resultado estará correlacionado con el que obtenga Romeo. En contra de lo que podría parecer, el entrelazamiento no puede usarse para enviar información de manera instantánea.



Conexión geométrica

Romeo y Julieta podrían crear dos agujeros negros con partículas entrelazadas. Una vez formados, dichos agujeros negros quedarían conectados a través de su interior por un agujero de gusano, como ocurre en la solución completa de Schwarzschild. Ni Romeo ni Julieta podrían atravesar esa conexión geométrica para llegar al otro lado, pero sí podrían encontrarse en su interior.



con el correspondiente microestado del segundo. En concreto, si observamos el primer agujero negro en un microestado determinado, el segundo deberá encontrarse exactamente en el mismo microestado.

Lo interesante es que, a partir de ciertas consideraciones relacionadas con la teoría de cuerdas y las teorías cuánticas de campos, puede argumentarse que un par de agujeros negros con sus microestados entrelazados de esta manera —es decir, en un estado de tipo EPR— darían lugar a un espaciotiempo en el que un puente de ER une el interior de ambos agujeros negros. En otras palabras, el entrelazamiento cuántico origina una conexión geométrica entre los dos agujeros negros.

A esto lo hemos llamado equivalencia entre ER y EPR, o ER = EPR, ya que relaciona los dos artículos que Einstein y sus colaboradores escribieron en 1935. Desde el punto de vista de EPR, las observaciones realizadas cerca del horizonte de cada uno de los agujeros negros se hallan correlacionadas debido al entrelazamiento cuántico. Desde el punto de vista del puente de ER, las observaciones están correlacionadas porque la distancia entre ambos sistemas es pequeña a través del agujero de gusano. Para establecer esta equivalencia, es importante que no podamos enviar información a través del agujero de gusano, ya que tampoco puede enviarse información usando el entrelazamiento.

Pensemos en un futuro muy lejano en el que dos familias enemistadas tratan de mantener a Romeo y Julieta separados. Mandan a Romeo a la galaxia de Andrómeda y retienen a Julieta en la Vía Láctea. Sin embargo, permiten que ambos se envíen mensajes y pares de sistemas cuánticos entrelazados. Esto les llevaría muchísimo tiempo, pero estamos en un futuro en el que la esperanza de vida es mucho mayor. Con paciencia, Romeo y Julieta podrían crear dos agujeros negros entrelazados. Dichos agujeros negros tendrían un aspecto normal vistos desde fuera, por lo que las familias nunca sospecharían nada. Sin embargo, una vez creados, Romeo y Julieta podrían dejarse caer en su interior y encontrarse allí por última vez antes de morir en la singularidad.

¿UN PRINCIPIO UNIVERSAL?

Las ideas que llevan hasta aquí han sido desarrolladas a través de los años por varios investigadores, comenzando por un estudio de 1976 de Werner Israel, de la Universidad de Alberta. Nuestro

trabajo con Susskind fue motivado por una paradoja planteada en 2012 por Ahmed Almheiri, Donald Marolf, Joseph Polchinski y James Sully, por aquella época todos en la Universidad de California en Santa Bárbara. En contra de lo que se pensaba hasta entonces, estos investigadores argumentaron que el entrelazamiento cuántico obligaba a reemplazar el horizonte de sucesos de un agujero negro (una superficie suave, según la teoría de Einstein) por una barrera impenetrable de alta energía [*véase* «Agujeros negros y muros de fuego», por Joseph Polchinski *y* «¿Fuego en el horizonte?», por Roberto Emparan; Investigación y Ciencia, abril de 2015]. En el contexto de la relación ER = EPR, dicha paradoja parece poder resolverse.

La equivalencia ER = EPR sugiere que siempre que haya un entrelazamiento cuántico debería surgir una conexión geométrica. Esto se aplicaría incluso al caso más simple en el que solo tenemos dos partículas entrelazadas. En tales situaciones, sin embargo, la conexión espacial podría implicar estructuras diminutas y muy cuánticas, las cuales no se parecerían mucho a nuestra noción usual de geometría. Aunque aún no sabemos cómo describir estas geometrías microscópicas, la idea es que la relación ER = EPR proporcionaría un principio que toda teoría cuántica de la gravedad debería respetar. La teoría de gravedad cuántica más estudiada es la teoría de cuerdas. En ella, la relación ER = EPR puede justificarse de manera rigurosa en algunos casos en los que el entrelazamiento adopta una forma muy específica, pero todavía no existe un consenso sobre si dicha equivalencia se cumple en todos los casos.

Hemos visto que el entrelazamiento cuántico puede, literalmente, acercar dos sistemas distantes. También sabemos que dos regiones cercanas del espacio están entrelazadas. Parece natural pensar que el espaciotiempo, una estructura continua, surja a partir del entrelazamiento, una propiedad profundamente cuántica. Esta idea se encuentra hoy en el punto de mira de varios investigadores, pero aún no se ha sintetizado en una formulación precisa.

PARA SABER MÁS

Über das Gravitationsfeld eines Massenpunktes nach der Einsteinschen Theorie. Karl Schwarzschild en *Sitzungsberichte der Königlich Preussischen Akademie der Wissenschaften*, vol. 7, págs. 189-196, febrero de 1916. Traducción al inglés de S. Antoci y A. Loinger disponible en **arxiv.org/abs/physics/9905030**

Can the quantum mechanical description of physical reality be considered complete? Albert Einstein, Boris Podolsky y Nathan Rosen en *The Physical Review* vol. 47, págs. 777-780, mayo de 1935. Disponible en **journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.47.777**

The particle problem in the general theory of relativity. Albert Einstein y Nathan Rosen en *The Physical Review*, vol. 48, págs. 73-77, julio de 1935. Disponible en **journals.aps.org/pr/pdf/10.1103/PhysRev.48.73**

Cool horizons for entangled black holes. Juan Maldacena y Leonard Susskind en *Fortschritte der Physik*, vol. 61, pág. 781-811, septiembre de 2013. Disponible en **arxiv.org/abs/1306.0533**

Entanglement and the geometry of spacetime. Juan Maldacena en *The Institute for Advanced Study Newsletter*, otoño de 2013. Versión preliminar y más sintética de este artículo. Disponible en **https://www.ias.edu/about/publications/ias-letter/articles/2013-fall/maldacena-entanglement**

EN NUESTRO ARCHIVO

La mecánica cuántica de los agujeros negros. S. Hawking en *IyC*, marzo de 1977.
Teoría cuántica y realidad. B. d'Espagnat en *IyC*, enero de 1980.
El espacio, ¿una ilusión? J. M. Maldacena en *IyC*, enero de 2006.

Artículo publicado por Albert Einstein en SCIENTIFIC AMERICAN, vol. 182, n.º 4, abril de 1950

Sobre la teoría generalizada de la gravitación

Un resumen de la recientemente publicada extensión de la teoría general de la relatividad, a la luz de su trasfondo histórico y filosófico

Albert Einstein

Los editores de Scientific American me han pedido que escriba sobre mi último trabajo, que acaba de ser publicado. Se trata de una investigación matemática sobre los fundamentos de la física de campos.

Algunos lectores tal vez se sientan desconcertados: ¿acaso no lo aprendimos todo sobre los fundamentos de la física cuando estábamos en la escuela? La respuesta puede ser «sí» o «no», dependiendo de la interpretación. Nos hemos habituado a conceptos y relaciones generales que nos facultan para comprender un inmenso abanico de experiencias y hacerlas accesibles al tratamiento matemático. En cierto sentido, estos conceptos y relaciones probablemente sean incluso finales. Así ocurre, por ejemplo, con las leyes de la refracción, con las relaciones de la termodinámica clásica basada en los conceptos de presión, volumen, temperatura, calor y trabajo, y con la hipótesis de la inexistencia de una máquina de movimiento perpetuo.

Entonces, ¿qué nos incita a concebir una teoría tras otra? ¿Qué nos incita a concebir teorías en absoluto? La respuesta a la última pregunta es, simplemente: porque nos gusta «comprender»; es decir, reducir los fenómenos mediante un proceso lógico a algo ya conocido o (en apariencia) evidente. Las nuevas teorías son necesarias, en primer lugar, cuando encontramos fenómenos que no pueden «explicarse» con las teorías existentes. Pero esta motivación para construir teorías nuevas es, por así decirlo, trivial, impuesta desde fuera. Hay otro motivo, más sutil y de no menos importancia: lograr la unificación y la simplificación de las premisas de la teoría como un todo (esto es, el principio de economía de Mach, interpretado como un principio lógico).

Existe una pasión por la comprensión, igual que existe una pasión por la música. Esa pasión es bastante común en los niños, pero en la mayoría de las personas se pierde más tarde. Sin ella no habría matemáticas ni ciencia natural. Una y otra vez, la pasión por el entendimiento nos ha hecho creer que el hombre es capaz de comprender el mundo objetivo de manera racional, por medio del pensamiento puro y sin fundamentos empíricos; en definitiva, por medio de la metafísica. Creo que todo verdadero teórico es una especie de metafísico domado, con independencia de cuán «positivista» se considere a sí mismo. El metafísico cree que todo lo lógicamente simple es también real. El metafísico domado no cree que todo lo lógicamente simple se encarne en la realidad que experimentamos, pero sí que toda experiencia sensorial puede «comprenderse» a partir de un sistema conceptual edificado sobre premisas de gran simplicidad. El escéptico dirá que esto no es más que un «credo milagroso». Y ciertamente lo es, pero se trata de un credo milagroso que se ha visto confirmado hasta extremos asombrosos por el desarrollo de la ciencia.

El auge del atomismo nos brinda un buen ejemplo. ¿Cómo pudo Leucipo llegar a una idea tan audaz? Si, al congelarse, el agua se convierte en hielo —algo aparentemente muy distinto del agua—, ¿por qué la fusión del hielo da lugar a algo que parece indistinguible del agua original? Perplejo, Leucipo busca una «explicación». Y concluye que, en esas transformaciones, la «esencia» del cuerpo no ha cambiado en absoluto. Tal vez el cuerpo se componga de partes inmutables y solo se haya alterado su distribución espacial. ¿No podría ocurrir lo mismo con todos los objetos materiales que, una y otra vez, surgen con casi idénticas cualidades?

La idea no se pierde por completo durante el largo período de hibernación del pensamiento occidental. Dos mil años después de Leucipo, Bernoulli se pregunta por qué un gas ejerce presión sobre las paredes del recipiente. ¿Debería esto «explicarse» por la repulsión mutua de las partes del gas, en el sentido de la mecánica de Newton? La hipótesis parece absurda, ya que, cuando todo lo demás permanece constante, la presión del gas depende de la temperatura. Suponer que las fuerzas de interacción newtonianas dependen de

la temperatura contradice el espíritu de la mecánica de Newton. Dado que Bernoulli está al tanto de la idea de atomismo, debe concluir que los átomos (o moléculas) chocan contra las paredes del recipiente y, al hacerlo, ejercen presión. Al fin y al cabo, hemos de suponer que los átomos se encuentran en movimiento. ¿Cómo, si no, dar cuenta de las diferentes temperaturas de los gases?

Una simple consideración mecánica revela que dicha presión solo depende de la energía cinética de las partículas y de su densidad en el espacio. Eso debería haber llevado a los físicos de la época a concluir que el calor consiste en el movimiento aleatorio de los átomos. Si hubieran tomado dicha consideración tan en serio como se merecía, el desarrollo de la teoría del calor —en particular, el descubrimiento de la equivalencia entre calor y energía mecánica— se habría visto facilitado considerablemente.

Este ejemplo pretende ilustrar dos cosas. La idea teórica (el atomismo, en este caso) no nace fuera ni independientemente de la experiencia; tampoco se deduce de ella mediante un procedimiento puramente lógico. Surge de un acto creativo. Una vez hemos adquirido una idea teórica, haremos bien en atenernos a ella hasta que nos lleve a una conclusión insostenible.

En cuanto a mi último trabajo teórico, no me siento justificado a explicarlo en detalle ante un amplio grupo de lectores interesados en ciencia. Eso solo debería hacerse con las teorías que han sido suficientemente confirmadas por la experiencia. Por ahora, lo que habla a favor de la teoría que expondremos aquí es la simplicidad de sus premisas y su íntima conexión con lo ya conocido (a saber, las leyes del campo gravitatorio puro). No obstante, tal vez un amplio grupo de lectores sí tenga interés en familiarizarse con la cadena de pensamientos que conducen a empeños de naturaleza tan extremadamente especulativa. También mostraremos qué clases de dificultades han aparecido y en qué sentido se han superado.

En la física de Newton, el concepto elemental sobre el que se asienta la descripción teórica de los cuerpos materiales es el de punto material, o partícula. La materia se concibe discontinua a priori. Eso obliga a considerar la acción de unos puntos materiales sobre otros como una «acción a distancia». Dado que dicha idea contradice en buena medida la experiencia cotidiana, los coetáneos de Newton —Newton incluido— la encontraron difícil de aceptar. Sin embargo, debido al casi milagroso éxito del sistema newtoniano, las sucesivas generaciones de físicos se habituaron al concepto de acción a distancia. Cualquier duda quedó enterrada durante largo tiempo.

En la segunda mitad del siglo xix, cuando se conocieron las leyes de la electrodinámica, se vio que estas no podían incorporarse de manera satisfactoria al sistema newtoniano. Es fascinante especular: ¿habría descubierto Faraday la ley de inducción electromagnética si hubiese recibido una educación superior regular? Libre de la carga del pensamiento tradicional, supo ver que introducir el «campo» como elemento autónomo de la realidad le ayudaba a combinar los hechos experimentales. Fue Maxwell quien comprendió la verdadera importancia del concepto de campo; quien hizo el descubrimiento fundamental de que las leyes de la electrodinámica podían expresarse de manera natural mediante ecuaciones diferenciales para los campos eléctrico y magnético. Dichas ecuaciones implicaban la existencia de ondas, cuyas propiedades se correspondían con las de la luz tal y como se conocían en aquella época.

Esa incorporación de la óptica al electromagnetismo supone uno de los grandes triunfos en el empeño hacia la unificación de los fundamentos de la física; Maxwell llegó a ella por argumentos puramente teóricos mucho antes de que se viese confirmada por el trabajo experimental de Hertz. La nueva idea permitía prescindir de la hipótesis de acción a distancia, al menos en el ámbito de los fenómenos electromagnéticos; el campo intermediario aparecía ahora como el único portador de la interacción entre cuerpos, y su comportamiento quedaba completamente determinado por procesos contiguos, expresados mediante ecuaciones diferenciales.

Entonces surgió una pregunta: dado que el campo existe incluso en el vacío, ¿habría de ser considerado como el estado de algún «transmisor», o merecería gozar de una existencia autónoma, irreducible? En otras palabras, ¿hay un «éter» que transmite el campo, uno que pueda considerarse en un estado ondulatorio, por ejemplo, cuando transporta ondas de luz?

La pregunta tiene una respuesta natural: dado que no podemos prescindir del concepto de campo, resulta preferible no introducir, además, un portador con propiedades hipotéticas. Sin embargo, los mismos pioneros que supieron ver la indispensabilidad del concepto de campo se encontraban aún demasiado imbuidos por la tradición mecanicista para aceptar sin reticencias este simple punto de vista. Con todo, dicho parecer iría afianzándose de manera imperceptible en el curso de las décadas posteriores.

La introducción del campo como concepto elemental reveló la incoherencia de la teoría como un todo. Aunque la teoría de Maxwell describe adecuadamente la interacción entre partículas con carga, no explica el comportamiento de las densidades eléctricas; es decir, no constituye una teoría de las partículas mismas. Por tanto, estas deben ser tratadas como puntos con masa, sobre la base de la antigua teoría. Combinar el concepto de campo continuo con el de puntos materiales discontinuos en el espacio no parece tener sentido. Una teoría de campos coherente requiere la continuidad de todos sus elementos no solo en el tiempo, sino también en el espacio, y en todos los puntos del espacio. En cuanto a concepto fundamental, la partícula material no tiene cabida en una teoría de campos. Incluso obviando el hecho de que no incluye la gravitación, la electrodinámica de Maxwell no puede considerarse una teoría completa.

Las ecuaciones de Maxwell en el vacío permanecen inalteradas si el tiempo y las coordenadas espaciales se someten a un tipo particular de transformaciones lineales: las transformaciones de Lorentz («covariancia» con respecto a las transformaciones de Lorentz). Por supuesto, la covariancia también se cumple para aquellas transformaciones que resultan de componer dos o más de ellas; a esto se le denomina propiedad «de grupo» de las transformaciones de Lorentz.

Las ecuaciones de Maxwell implican el «grupo de Lorentz», pero el grupo de Lorentz no implica las ecuaciones de Maxwell. De hecho, este puede definirse con independencia de las ecuaciones de Max-

well como un grupo de transformaciones que deja invariante un valor particular de la velocidad: el de la velocidad de la luz. Tales transformaciones representan la transición de un «sistema inercial» a otro que se mueve de manera uniforme con respecto al primero. La propiedad más sobresaliente de este grupo de transformaciones es que elimina el carácter absoluto de la simultaneidad de los sucesos que ocurren alejados en el espacio (teoría especial de la relatividad). Así pues, resultó que las ecuaciones de Maxwell conducían a un principio heurístico que era válido mucho más allá del dominio de aplicabilidad de las propias ecuaciones.

La relatividad especial y la mecánica newtoniana tienen en común una propiedad. Sus leyes son válidas solamente en ciertos sistemas de coordenadas: aquellos denominados «inerciales». Un sistema inercial es uno cuyo estado de movimiento hace que los puntos materiales que «no sienten ninguna fuerza» no se aceleren con respecto a él. Sin embargo, esta definición estará vacía a menos que dispongamos de un método independiente para identificar la ausencia de fuerzas. No obstante, si la gravitación se considera como un campo, tal método de identificación no existe.

Sea A un sistema uniformemente acelerado con respecto al «sistema inercial» I. Los puntos materiales que no estén acelerados con respecto a I lo estarán con respecto a A, todos ellos con idéntica aceleración, tanto en dirección como en magnitud. Se comportarán como si en A hubiese un campo gravitatorio, ya que una propiedad característica de dicho campo es que la aceleración que imprime a los cuerpos no depende de la naturaleza particular de estos. No hay ningún motivo para excluir la posibilidad de interpretar ese comportamiento como el efecto de un «verdadero» campo gravitatorio (principio de equivalencia). Esta interpretación implica que también A es un «sistema inercial», aunque esté acelerado con respecto a otro. (En este argumento, resulta esencial que la introducción de un campo gravitatorio independiente se considere justificada aun cuando no hayamos definido las masas que generan el campo. A Newton, por tanto, no le habría parecido convincente.)

Así pues, los conceptos de sistema inercial, ley de inercia y ley de movimiento quedan desprovistos de un significado concreto; no solo en mecánica clásica, sino también en relatividad especial. Además, siguiendo esta línea de pensamiento se llega a la conclusión de que, con respecto a A, el tiempo no puede medirse con relojes idénticos; se pierde incluso el significado físico inmediato de diferencia de coordenadas. Ante todas estas dificultades, ¿no deberíamos asirnos al concepto de sistema inercial y renunciar a explicar la característica fundamental de los fenómenos gravitatorios, que en el sistema newtoniano se manifiesta en la igualdad entre masa gravitatoria y masa inercial? Quienes confían en la inteligibilidad de la naturaleza deben responder: No.

El punto esencial del principio de equivalencia es el siguiente: para que la teoría dé cuenta de la igualdad entre masa inercial y masa gravitatoria, resulta necesario admitir transformaciones no lineales de las cuatro coordenadas. Es decir, el grupo de transformaciones de Lorentz —y, por tanto, el conjunto de sistemas de coordenadas «permisibles»— debe extenderse.

¿Qué grupo de transformaciones de coordenadas puede sustituir al grupo de Lorentz? La matemática sugiere una respuesta basada en las investigaciones fundamentales de Gauss y Riemann: el sustituto adecuado consta de todas las transformaciones continuas (analíticas) de las coordenadas. Lo único que permanece invariante bajo tales transformaciones es el hecho de que dos puntos muy cercanos tendrán siempre coordenadas casi idénticas; el sistema de coordenadas solo refleja el orden topológico de los puntos en el espacio (incluido su carácter tetradimensional). Las ecuaciones que expresen leyes de la naturaleza deberán ser covariantes con respecto a todas las transformaciones continuas de coordenadas. Este es el principio de relatividad general.

El método que acabamos de describir supera una deficiencia de los fundamentos de la mecánica que ya había sido advertida por Newton y criticada por Leibniz y, dos siglos después, también por Mach: la inercia es la resistencia a la aceleración, pero ¿a la aceleración con respecto a qué? En el marco de la mecánica clásica, la única respuesta posible es que la inercia resiste la aceleración con respecto al espacio. Esto constituye una propiedad física del espacio: el espacio actúa sobre los objetos, pero los objetos no actúan sobre él. Probablemente este sea el significado más profundo de la aserción de Newton *spatium est absolutum* (el espacio es absoluto). Pero la idea inquietaba a algunos, en particular a Leibniz, quien, en lugar de atribuir una existencia independiente al espacio, lo consideraba una mera propiedad de «las cosas» (contigüidad de los objetos físicos). Si todas estas justificadas dudas hubieran triunfado en aquel momento, difícilmente habrían sido de ayuda para la física, pues en el siglo XVII los fundamentos empíricos y teóricos necesarios para resolverlas aún no se encontraban disponibles.

Según la relatividad general, no existe una idea de espacio desprovista de contenido físico. La realidad física del espacio queda representada por un campo cuyas componentes son funciones continuas de cuatro variables independientes: las coordenadas del espacio y del tiempo. Es este tipo particular de dependencia lo que expresa el carácter espacial de la realidad física.

Dado que la teoría de la relatividad general implica representar la realidad física mediante un campo continuo, el concepto de partícula, o punto material, no puede desempeñar ningún papel fundamental, como tampoco el de movimiento. La partícula solo podrá aparecer como una región limitada del espacio donde la intensidad del campo o la densidad de energía resulten particularmente elevadas.

Una teoría relativista debe responder dos preguntas: 1) ¿Cuál es la naturaleza matemática del campo? 2) ¿Qué ecuaciones cumple?

Con respecto a la primera cuestión: desde el punto de vista matemático, el campo queda básicamente caracterizado por el modo en que cambian sus componentes al aplicar una transformación de coordenadas. Con respecto a la segunda: las ecuaciones deben determinar el campo *de manera suficiente* al tiempo que cumplen los postulados de la relatividad general. Que este requisito pueda satisfacerse o no depende de la elección del tipo de campo.

Tratar de comprender las correlaciones entre los datos empíricos a partir de un programa tan sumamente abstracto podría parecer, en un principio, una tarea casi sin esperanza. De hecho, el procedimiento se reduce a preguntar: ¿cuál es la propiedad más simple que puede exigirse del objeto (campo) más simple posible y que aún preserva el principio de relatividad general? Desde el punto de vista de la lógica formal, la naturaleza dual de la pregunta augura una calamidad, y ello dejando a un lado la vaguedad del concepto «simple». Por si fuera poco, no hay nada en la física que garantice que lo «lógicamente simple» deba ser también «cierto».

No obstante, toda teoría es especulativa. Cuando los conceptos básicos de una teoría se encuentran relativamente cercanos a la experiencia (como ocurre con las nociones de fuerza, presión o masa), su carácter especulativo resulta menos discernible. Sin embargo, cuando una teoría requiere hacer uso de complicados procesos lógicos para, a partir de las premisas, alcanzar conclusiones que puedan ser contrastadas mediante la observación, todos nos hacemos cargo de su naturaleza especulativa. En tal caso, un sentimiento de aversión casi inevitable se apodera de quienes, poco duchos en el análisis epistemológico, no son conscientes de lo precario del pensamiento teórico en aquellas disciplinas que les son familiares.

Por otro lado, es cierto que las teorías cuyos conceptos básicos e hipótesis fundamentales se hallan cercanas a la experiencia cuentan con una importante ventaja; una mayor confianza en ellas se encuentra sin duda justificada. Hay menos peligro de extraviarse por completo; sobre todo, porque requiere mucho menos tiempo y esfuerzo refutarlas por medios empíricos. Pero, cada vez más, a medida que aumenta la profundidad de nuestro conocimiento, nos vemos obligados a renunciar a dicha ventaja en nuestra búsqueda de la simplicidad lógica y la uniformidad en los fundamentos de la teoría física.

Hemos de admitir que la relatividad general ha ido más lejos que otras teorías a la hora abandonar la «cercanía a la experiencia» de sus conceptos fundamentales en pos de la simplicidad lógica. Así ocurre con la teoría de la gravedad y, más aún, con su nueva generalización. Esta última constituye un intento de abarcar las propiedades del campo total. En la teoría generalizada, derivar conclusiones empíricas a partir de las premisas resulta tan complejo que, por ahora, no se ha obtenido ningún resultado al respecto. En este momento hablan a favor de ella su simplicidad y su «rigidez». Rigidez quiere decir que la teoría es cierta o falsa, pero no modificable.

La mayor dificultad interna que se opone al desarrollo de la teoría de la relatividad radica en la naturaleza dual del problema, expresada mediante las dos preguntas anteriores. Esa dualidad ha sido la responsable de que el desarrollo de la teoría haya tenido lugar en dos etapas muy separadas en el tiempo. La primera de ellas, la teoría de la gravitación, se basa en el principio de equivalencia expuesto más arriba, así como en la siguiente consideración: según la teoría de la relatividad especial, la luz se propaga a velocidad constante. Si, en el vacío, un rayo de luz parte del punto con coordenadas tridimensionales x_1, x_2 y x_3 en el instante x_4, se expandirá como una onda esférica y alcanzará el punto vecino $(x_1 + dx_1, x_2 + dx_2, x_3 + dx_3)$ en el instante $x_4 + dx_4$. Una vez introducida la velocidad de la luz, c, llegamos a la expresión:

$$\sqrt{dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2} = c\,dx_4,$$

la cual puede también escribirse como:

$$dx_1^2 + dx_2^2 + dx_3^2 - c^2 dx_4^2 = 0.$$

Esta ecuación expresa una relación objetiva entre puntos vecinos del espaciotiempo en cuatro dimensiones, y resulta válida para todos los sistemas inerciales siempre que las transformaciones de coordenadas se restrinjan a las de la relatividad especial. Sin embargo, la relación pierde su forma si, tal y como dicta el principio de relatividad general, permitimos transformaciones continuas de cualquier tipo. En tal caso, la relación adopta la forma más general:

$$\sum_{ik} g_{ik}\, dx_i\, dx_k = 0.$$

Las g_{ik} son ciertas funciones de las coordenadas que se transforman de manera precisa bajo un cambio de coordenadas continuo. Según el principio de equivalencia, las funciones g_{ik} describen un tipo particular de campo gravitatorio: uno que puede obtenerse a partir del espacio «sin campos» mediante la transformación adecuada. Las g_{ik} satisfacen una ley de transformación particular. En jerga matemática, son las componentes de un «tensor» con una propiedad de simetría que se preserva en todas las transformaciones. Dicha propiedad de simetría se expresa de la siguiente manera:

$$g_{ik} = g_{ki}.$$

La idea se sugiere a sí misma: ¿por qué no atribuir un significado objetivo a este tensor simétrico, aun cuando el campo no pueda obtenerse a partir del espacio vacío de la relatividad especial por medio de una transformación de coordenadas? Si bien no podemos esperar que dicho tensor simétrico describa el campo más general, nada impide que describa el caso correspondiente al «campo gravitatorio puro». Así pues, al menos en un caso particular, es evidente qué tipo de campo debe postular la relatividad general: un campo tensorial simétrico.

Ya solo nos queda responder a la segunda pregunta: ¿qué ley de campos covariante general puede postularse para un campo tensorial simétrico?

Esta cuestión no ha resultado difícil de responder en nuestro tiempo, pues las ideas matemáticas necesarias ya estaban disponibles en forma de la teoría métrica de las superficies, creada hace un siglo por Gauss y extendida por Riemann a espacios con un número arbitrario de dimensiones. El resultado de esta investigación formal ha sido asombroso en numerosos aspectos. Las ecuaciones diferenciales que cabe postular como ley de campo para las g_{ik} no pueden ser de orden menor que dos; es decir, han de contener, como poco, derivadas segundas de las g_{ik} con respecto a las coordenadas. Si suponemos que en la ley no aparecen derivadas de orden superior, *esta queda matemáticamente determinada por el principio de relatividad general*. El sistema de ecuaciones puede escribirse de la forma:

$$R_{ik} = 0.$$

Las R_{ik} se transforman igual que las g_{ik}; esto es, también constituyen un tensor simétrico.

Estas ecuaciones diferenciales reemplazan por completo la teoría newtoniana del movimiento de los cuerpos celestes, siempre que las masas queden representadas por singularidades del campo. En otras palabras, incluyen la ley de las fuerzas y la del movimiento y, al mismo tiempo, eliminan los sistemas inerciales.

El hecho de que las masas aparezcan en forma de singularidades indica que las masas mismas no pueden ser explicadas mediante campos g_{ik} simétricos, o «campos gravitacionales». Ni siquiera el hecho de que solo existen masas gravitantes positivas puede deducirse de la teoría. Resulta evidente que una teoría de campos relativista completa debe basarse en un campo más complejo; esto es, en una generalización del campo tensorial simétrico.



Antes de considerar dicha generalización, resultará esencial para lo que sigue hacer dos observaciones sobre la teoría gravitacional.

La primera es que el principio de relatividad general limita enormemente las posibilidades teóricas. Sin este restrictivo

principio, sería casi imposible encontrar las ecuaciones de la gravitación, ni siquiera empleando el principio de relatividad especial y ni siquiera sabiendo que el campo debe quedar descrito por un tensor simétrico. Ninguna acumulación de hechos conducirá a tales ecuaciones a menos que se imponga el principio de relatividad general. Esta es la razón por la que, en mi opinión, todo intento de lograr un conocimiento más profundo de los fundamentos de la física se verá abocado al fracaso si sus conceptos generales no concuerdan desde el primer momento con la relatividad general. Esta situación dificulta emplear nuestro saber empírico, ciertamente amplio, para buscar los conceptos y relaciones fundamentales de la física, y nos obliga a recurrir a un grado de especulación mucho mayor que el adoptado hoy por la mayoría de los físicos. No veo ninguna razón para suponer que el significado heurístico del principio de relatividad general deba limitarse a la gravitación y que el resto de la física pueda tratarse por separado sobre la base de la relatividad especial, con la esperanza de que, algún día, el conjunto podrá encajarse de manera coherente en un marco relativista general. No creo que esa actitud, aunque entendible desde una perspectiva histórica, esté objetivamente justificada. La relativa pequeñez de lo que hoy conocemos como fenómenos gravitatorios no proporciona ninguna razón de peso para dejar de lado el principio de relatividad general en las investigaciones teóricas fundamentales. En otras palabras, no considero justificable preguntar: ¿cómo sería la física sin gravitación?

La segunda observación es que las ecuaciones de la gravedad constituyen 10 ecuaciones diferenciales para las 10 componentes del tensor simétrico g_{ik}. En una teoría que no sea relativista general, un sistema no estará sobredeterminado si el número de ecuaciones iguala al de funciones desconocidas. El espacio de soluciones es tal que algunas funciones de tres variables pueden escogerse al azar. En una teoría relativista general, dicha propiedad no puede darse por garantizada desde el principio. La libertad para elegir el sistema de coordenadas implica que, de las 10 funciones, o componentes del campo, que conforman una solución, hay 4 que pueden tomar valores preestablecidos si el sistema de coordenadas se elige de la manera adecuada. En otras palabras, el principio de relatividad general implica que el número de funciones que deben quedar determinadas por 10 ecuaciones diferenciales no es 10, sino 10 – 4 = 6. Para esas 6 funciones, solo pueden postularse 6 ecuaciones diferenciales independientes. De las 10 ecuaciones del campo gravitatorio, solo 6 deberían ser autónomas; las 4 restantes tendrían que estar conectadas con las otras 6 por medio de 4 relaciones (identidades). Y, de hecho, entre los miembros del lado izquierdo de las 10 ecuaciones gravitacionales, las R_{ik}, existen cuatro identidades (las «identidades de Bianchi») que aseguran su compatibilidad.

En un caso como este —cuando el número de variables de campo iguala al de ecuaciones diferenciales—, la compatibilidad estará garantizada si las ecuaciones pueden obtenerse a partir de un principio variacional. Así ocurre con las ecuaciones del campo gravitatorio.

Sin embargo, las 10 ecuaciones no pueden reemplazarse por completo por 6. El sistema de ecuaciones se encuentra, de hecho, «sobredeterminado». Pero, gracias a la existencia de las identidades, su compatibilidad no se encuentra comprometida; esto es, el espacio de soluciones no se ve fatalmente restringido. El hecho de que las ecuaciones de la gravitación impliquen la ley de movimiento de las masas se halla íntimamente conectado con esta (permisible) sobredeterminación.

Después de estos preparativos, no resultará difícil entender la naturaleza de la presente investigación sin entrar en sus detalles matemáticos. El problema consiste en construir una teoría relativista para el campo total. La pista más importante de la que disponemos es la existencia de una solución para el caso particular del campo gravitacional puro. La teoría que estamos buscando debe, por tanto, constituir una generalización de la teoría del campo gravitatorio. La primera pregunta es: ¿cuál es la generalización natural del campo tensorial simétrico?

Esta cuestión no puede responderse sino en conexión con otra: ¿qué generalización del campo proporcionará el sistema teórico más natural? La respuesta sobre la que se basa la teoría que consideraremos aquí establece que el campo tensorial simétrico debe reemplazarse por uno no simétrico. Ello significa que hemos de renunciar a que sus componentes cumplan la condición $g_{ik} = g_{ki}$. En tal caso, el campo no tendrá 10 componentes independientes, sino 16.

Aún hemos de establecer las ecuaciones diferenciales relativistas para el campo tensorial no simétrico. Al atacar este problema, nos encontramos con una dificultad que no aparece en el caso del campo simétrico. El principio de relatividad general no basta para determinar por completo las ecuaciones del campo; principalmente, porque la ley de transformación de la parte simétrica no afecta a las componentes de la parte antisimétrica, ni viceversa. Ello probablemente explique el hecho de que este tipo de generalización apenas se haya intentado en el pasado. Combinar las dos partes del campo solo puede considerarse natural si únicamente el campo total, y no sus partes simétrica y antisimétrica por separado, desempeña algún papel en el formalismo de la teoría.

Resulta que esta condición puede, de hecho, satisfacerse de manera natural. Pero incluso dicho requerimiento, junto con el principio de relatividad general, sigue sin ser suficiente para determinar de manera unívoca las ecuaciones de campo. Recordemos que el sistema de ecuaciones debe cumplir una condición adicional: las ecuaciones han de ser compatibles. Más arriba se ha mencionado que este requisito queda satisfecho cuando las ecuaciones pueden derivarse de un principio variacional.

Esto último también se ha logrado, aunque de modo menos natural que en el caso del campo simétrico. Ha sido perturbador encontrar que podía conseguirse de dos maneras. Dichos principios variacionales suministraban dos sistemas de ecuaciones —llamémoslos E_1 y E_2— distintos entre sí (si bien solo ligeramente), cada uno de los cuales adolecía de sus propias imperfecciones. Así pues, incluso la condición de compatibilidad resulta insuficiente para determinar de forma única el sistema de ecuaciones.

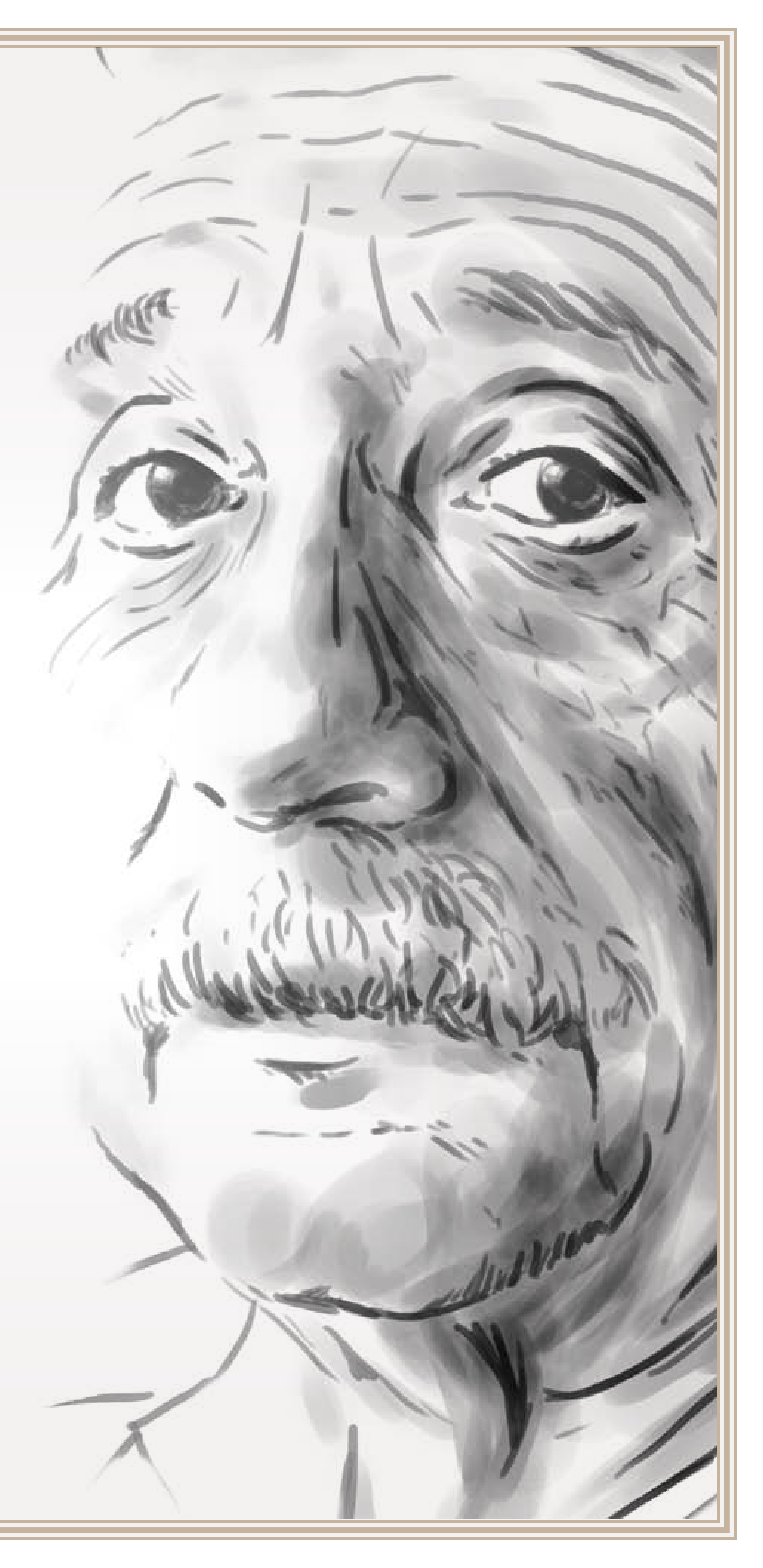
De hecho, fueron los defectos formales de los sistemas E_1 y E_2 los que indicaron una posible salida. Existe un tercer sistema de ecuaciones, E_3, libre de los defectos formales de E_1 y E_2 y que representa una combinación de ambos, en el sentido de que toda solución de E_3 constituye una solución de E_1 y también de E_2. Ello sugiere que E_3 tal vez sea el sistema que estábamos buscando. Entonces, ¿por qué no postular E_3 como el sistema de ecuaciones? Semejante procedimiento no está justificado sin un análisis más cuidadoso, ya que la compatibilidad de E_1 y E_2 no implica la compatibilidad de E_3, donde el número de ecuaciones excede en cuatro el de componentes del campo.

Una consideración independiente muestra que, al margen de la cuestión de

la compatibilidad del sistema mayor, E_3, este proporciona la única generalización realmente natural de las ecuaciones de la gravitación.

Pero E_3 no es un sistema compatible en el mismo sentido en que lo son E_1 y E_2. En estos, la compatibilidad queda asegurada por un número suficiente de identidades, lo que significa que todo campo que satisfaga las ecuaciones para un valor definido del tiempo tendrá una extensión continua que representará una solución en el espacio tetradimensional. El sistema E_3 no es, sin embargo, extensible de la misma manera. En el lenguaje de la mecánica clásica podemos decir que, en el caso del sistema E_3, las condiciones iniciales no pueden elegirse con libertad. Lo que realmente importa es la respuesta a la siguiente pregunta: ¿es el espacio de soluciones del sistema E_3 tan extenso como debe exigirse a una teoría física? Por el momento, este problema puramente matemático carece de solución.

El escéptico dirá: «Tal vez sea cierto que dicho sistema de ecuaciones resulte razonable desde un punto de vista lógico. Pero ello no prueba que corresponda a la naturaleza». Tienes razón, querido escéptico. Solo la experiencia puede decidir sobre la verdad. Pero habremos conseguido algo si hemos logrado formular una pregunta precisa y con significado. Su confirmación o refutación no será sencilla, a pesar de la abundancia de hechos empíricos conocidos. La derivación, a partir de las ecuaciones, de conclusiones que puedan confrontarse con la experiencia requerirá concienzudos esfuerzos y, probablemente, nuevos métodos matemáticos.



PARA SABER MÁS

Generalization of the relativistic theory of gravitation. Albert Einstein en *Annals of Mathematics*, vol. 46, n.º 4, págs. 578-584, octubre de 1945.

Generalization of the relativistic theory of gravitation, II. Albert Einstein y Ernst G. Straus en *Annals of Mathematics*, vol. 47, n.º 4, págs. 731-741, octubre de 1946.

A generalized theory of gravitation. Albert Einstein en *Reviews of Modern Physics*, vol 20, n.º 1, págs. 35-39, enero de 1948.

The Bianchi identities in the generalized theory of gravitation. Albert Einstein en *Canadian Journal of Mathematics*, vol. 2, n.º 1, págs. 120-128, febrero de 1950. Disponible en **https://cms.math.ca/10.4153/CJM-1950-011-4**

EN NUESTRO ARCHIVO

La unificación de las fuerzas. George Musser en *IyC*, noviembre de 2004.

por Bartolo Luque

Bartolo Luque es físico y profesor de matemáticas en la Universidad Politécnica de Madrid. Sus investigaciones se centran en la teoría de sistemas complejos.



La edad del universo

De la paradoja de Olbers a la geometría del cosmos según la relatividad general

En 1692, el reverendo inglés Richard Bentley expuso a Isaac Newton la siguiente paradoja: dado que la fuerza gravitatoria es siempre atractiva, si el universo fuese finito, toda la materia acabaría colapsando en su centro de masas. Newton sorteó la cuestión respondiendo que el universo debía ser infinito y con la materia distribuida de manera homogénea, de modo que todas las fuerzas gravitatorias se anularían mutuamente. Pero la solución de Newton generaba a su vez otra paradoja: si el universo estaba poblado por infinitas estrellas, ¿cómo era posible que la noche fuese negra?

Imaginemos un universo infinito y con las estrellas repartidas de modo uniforme. Consideremos una esfera gigantesca de radio R centrada en la Tierra. El número N de estrellas sobre su superficie será $N \sim 4\pi R^2$, proporcional al área de la esfera. Por otro lado, la intensidad luminosa I de cada astro nos llegará atenuada por su distancia al cuadrado, $I \sim 1/R^2$. De esta manera, la intensidad total I_t que nos alcanzará, $I_t = NI$, será constante e independiente del radio R. Así pues, si consideramos un espacio infinito y calculamos la intensidad proveniente de todo el cielo (un número infinito de esferas), esta debería ser infinita. Por muy baja que fuese la densidad de estrellas, el cielo nocturno tendría que ser deslumbrante.

A principios del siglo XIX, el astrónomo alemán Heinrich Wilhelm Matthias Olbers hizo popular el problema, que desde entonces se conoce como paradoja de Olbers aunque no fuese él el primero en plantearla ni diese ninguna explicación nueva. ¿Cómo resolverla?

Ya a finales del siglo XVIII los astrónomos pensaban que toda la materia del universo estaba concentrada en una estructura finita, aplanada y en rotación: una especie de isla cósmica llamada galaxia. La rotación impediría el colapso de las estrellas y, puesto que la galaxia contendría un número limitado de astros, la noche podía ser negra. Era una posibilidad, pero existía otra más ingeniosa.

La alternativa no fue propuesta por ningún astrónomo, sino por el escritor y periodista estadounidense Edgar Allan Poe. En su ensayo *Eureka*, de 1848, Poe razona que la velocidad de la luz no es infinita, sino finita, y que si el cielo nocturno no brilla de forma deslumbrante es porque todavía no nos ha llegado la luz de las estrellas más lejanas. Sin embargo, la solución de Poe implica que el universo no puede haber existido desde siempre, ya que, en un universo infinitamente viejo, la luz de todas las estrellas sí habría tenido tiempo de llegar a la Tierra.

Así pues, la paradoja de Olbers nos lleva a concluir que, o bien el universo es finito (una isla de materia en rotación) o, si es infinito, hubo de tener un comienzo. La oscuridad de la noche nos está contando que el universo no puede ser infinitamente vasto e infinitamente viejo al mismo tiempo.

La ley de Hubble

A principios del siglo XX se estimaba que la galaxia tendría un diámetro de unos 100.000 años luz. Pero, en los años veinte, los astrónomos se toparon con un universo muchísimo mayor: «la» galaxia resultó ser una más entre otras muchas separadas por enormes distancias. Así que, en cuanto a la paradoja de Olbers, todo apuntaba a decantarse por la alternativa de Poe, un universo con un inicio en el tiempo.

En 1929, Edwin Powell Hubble descubrió que las galaxias se alejan unas de otras en todas direcciones. Lo hacen de tal manera que, cuanto más lejos se encuentran de un punto dado, más deprisa huyen de él. A partir de datos observacionales, el astrónomo determinó la que hoy conocemos como ley de Hubble:

$$v = H_0 d\,,$$

donde v indica la velocidad a la que una galaxia se aleja de nosotros, d la distancia a la que se encuentra y H_0 es una constante, la constante de Hubble.

La explicación más extendida de este fenómeno entre los cosmólogos es que el universo se expande. Lo que se estira es el espacio mismo, como si de un tejido deformable se tratara. Una analogía muy usada nos permite visualizar dicho efecto: si pintamos una serie de puntos en un globo y lo inflamos, veremos que los puntos se alejan unos de otros, al igual que las galaxias. No es que los puntos se muevan, sino que el espacio en el que viven se hincha. Para entender qué le ocurre al cosmos, habremos de hacer un ejercicio de abstracción y pensar en nuestro universo como en una goma elástica tridimensional inmersa en un espacio de cuatro dimensiones (si bien este último espacio, por supuesto, resulta imposible de visualizar).

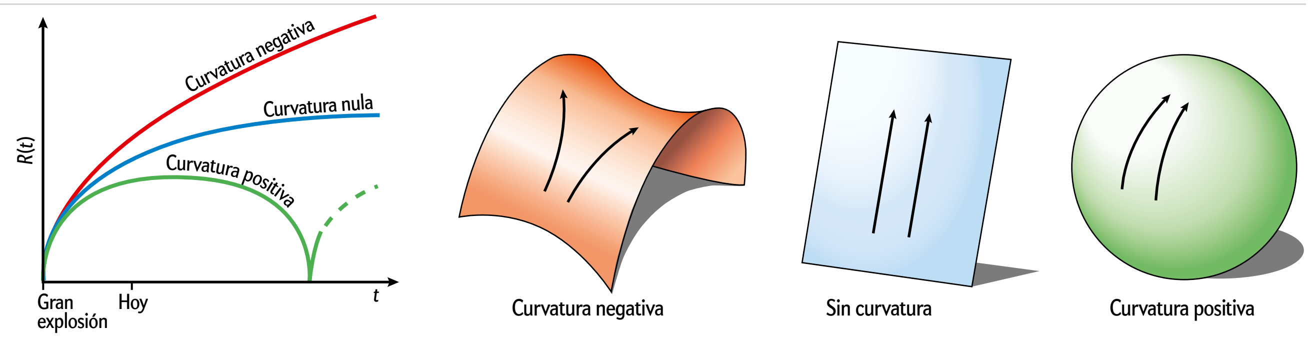
Aparte de explicar la ley de Hubble, la expansión del universo permite sortear el problema del colapso gravitatorio, ya que el crecimiento del espacio contrarrestaría la atracción gravitatoria entre galaxias. Pero, además, si pasamos al revés la película de la evolución del universo, asistiremos a un instante en el que toda la materia se hallaba concentrada en un punto. Llegaremos así al principio de todas las cosas: la gran explosión.

Espacio, tiempo y distancia

Hemos discutido sobre la finitud o infinitud espacial y temporal del universo. Pero ¿es legítimo preguntarse sobre su «forma»? En la analogía del globo, ¿se parece nuestro universo a una lámina plana, a una esfera o a algo más exótico?

La teoría de la relatividad general de Einstein, cuyo centenario celebramos este mes, nos dice que el espacio es deformable y que su geometría depende de la materia y la energía que contiene. Las célebres ecuaciones de Einstein establecen justo eso: cómo cambian los objetos la geometría del espaciotiempo.

Para estudiar la geometría del espacio físico, los investigadores disponen de una herramienta extremadamente útil: las métricas. Su uso moderno se remonta a los trabajos de Carl Friedrich Gauss, János Bolyai, Nicolái Lobachevski y, en especial, Bernhard Riemann, quien en el



GEOMETRÍAS CÓSMICAS: La distancia entre dos puntos distantes del universo (dos galaxias, por ejemplo) es proporcional al factor de escala, $R(t)$, una función dependiente de la edad del universo (t). La evolución de $R(t)$ (*izquierda*) depende a su vez de la curvatura del espacio tridimensional, la cual puede ser negativa, nula o positiva. El análogo en dos dimensiones de tales geometrías corresponde, respectivamente, a una silla de montar, un plano o una esfera (*derecha*). Entre otras propiedades, estas superficies se diferencian en el comportamiento de las líneas paralelas (*flechas*).

siglo XIX impulsó el estudio de las geometrías no euclídeas. Una métrica no es más que una función que proporciona la distancia entre dos puntos a partir de las propiedades intrínsecas del espacio (es decir, sin tener que imaginarlo como un espacio inmerso en otro de una dimensión más).

La métrica euclídea nos permite calcular distancias en un espacio «plano»; esto es, en uno en el que la distancia entre dos líneas paralelas permanece constante y donde los ángulos de un triángulo suman siempre 180 grados. Dichas cualidades se corresponden con nuestra noción intuitiva de la geometría del espacio físico.

En el espacio euclídeo tridimensional, la distancia ds entre un punto de coordenadas (x_1, y_1, z_1) y otro con coordenadas (x_2, y_2, z_2) viene dada por la métrica:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2,$$

donde $dx = x_2 - x_1$, $dy = y_2 - y_1$ y $dz = z_2 - z_1$. Esta expresión no es otra que el teorema de Pitágoras.

Para trasladar la métrica euclídea al contexto de la teoría de la relatividad, habremos de añadirle una cuarta dimensión al espacio tridimensional: el tiempo. Obtenemos así un espaciotiempo tetradimensional plano formado por puntos llamados «eventos». La función que nos dice cómo calcular la distancia entre dos eventos es la métrica de Minkowski, así llamada en honor al matemático ruso Hermann Minkowski:

$$ds^2 = dx^2 + dy^2 + dz^2 - c^2dt^2.$$

En el espacio euclídeo tridimensional, las tres coordenadas intervienen de la misma forma. En la métrica de Minkowski, el término temporal aparece precedido de un signo menos y, para que todas las coordenadas tengan dimensiones de longitud, el tiempo suele multiplicarse por c, la velocidad de la luz. Según la teoría de la relatividad, esta es la métrica del espaciotiempo en ausencia de materia y energía; es decir, sin campo gravitatorio.

En presencia de energía y materia, y una vez conocida su distribución, las ecuaciones de Einstein se convierten en ecuaciones diferenciales en las que la incógnita es la métrica. Para resolverlas suelen imponerse, además, ciertas restricciones razonables sobre la forma que esperamos que adopte la geometría.

La primera solución exacta de las ecuaciones de Einstein fue obtenida en 1916 por el físico alemán Karl Schwarzschild, quien halló la métrica del espaciotiempo que rodea a un cuerpo esférico, como la Tierra o el Sol. Para calcularla hay que resolver las ecuaciones de Einstein imponiendo la condición de que la métrica presente simetría esférica. La solución de Schwarzschild explica los fenómenos gravitatorios que se observan en las inmediaciones de las estrellas y los planetas.

Esferas y sillas de montar

¿Qué ocurre si en lugar de considerar el espacio en los alrededores de una estrella intentamos estudiar la geometría de todo el universo? Para ello habremos de resolver las ecuaciones de Einstein imponiendo dos condiciones muy generales sobre la métrica: homogeneidad (a grandes escalas, en el universo no hay lugares privilegiados) e isotropía (tampoco hay direcciones privilegiadas). La validez de estas hipótesis, propuestas en 1915 por el propio Einstein, sigue en la actualidad respaldada por las observaciones.

La solución más general posible de las ecuaciones de Einstein compatible con dichas restricciones fue obtenida en 1935 por los matemáticos Howard P. Robertson y Arthur G. Walker. El resultado se conoce hoy con el nombre de métrica de Friedmann-Robertson-Walker (FRW):

$$ds^2 = \frac{R^2(t)}{\left(1+\frac{kr^2}{4}\right)^2}(dx^2 + dy^2 + dz^2) - c^2dt^2.$$

Aquí r es una función de x, y y z que no nos detendremos a analizar, puesto que no desempeña papel alguno en la discusión que sigue. Sí que nos interesan el factor de escala del universo, $R(t)$, y la constante de curvatura, k, que puede tomar los valores −1, 0 o +1.

Observemos que la parte espacial de la métrica, la que nos permite calcular la distancia entre dos puntos del espacio, depende del tiempo a través de $R(t)$. De modo que una extraordinaria predicción de la métrica de FRW es que el tamaño del universo puede variar con el tiempo según la forma que adopte esta función. Sin embargo, las hipótesis de homogeneidad e isotropía la dejan indeterminada. Dependiendo de qué función $R(t)$ tomemos, o de qué k de las tres posibles elijamos, tendremos una métrica u otra. Por ejemplo, para $k = 0$ y $R(t) = 1$ la solución se convierte en la métrica plana de Minkowski.

En 1922, el matemático y físico ruso Alexandr Friedmann (la F que nos faltaba en FRW) había analizado las ecuaciones de Einstein imponiendo ciertas hipótesis sobre el contenido de materia y energía del universo (básicamente, un fluido ideal de galaxias y radiación). Tales condiciones, sumadas al resultado empírico de que el universo se expande, reducen las posibles métricas a tres casos generales:

- Si $k = -1$, el universo tiene curvatura constante negativa, como ocurre en dos dimensiones con la superficie de una silla de montar. En tales geometrías las líneas paralelas tienden a separarse.
- Si $k = +1$, la curvatura será constante y positiva. El análogo bidimensional nos

lo proporciona la superficie de una esfera. En ella las líneas paralelas acaban cortándose, como los meridianos terrestres.

- Si $k = 0$, las hipersuperficies a tiempo constante serán planas, con una geometría espacial correspondiente a un volumen euclídeo infinito. En él, las líneas paralelas ni se acercan ni se separan.

Subrayemos que k es una constante, por lo que la curvatura del universo permanece invariante a lo largo de toda su historia. Los universos de curvatura negativa y nula representan universos infinitos, y si viajáramos en línea recta por ellos nunca más se sabría de nosotros. En cambio, un cosmos con curvatura positiva es uno finito, aunque sin frontera. Si avanzásemos en línea recta en cualquier dirección terminaríamos volviendo al punto de partida, como ocurre en la superficie de una esfera. Por este motivo recibe el nombre de universo «cerrado». Por contraposición, al universo de curvatura negativa se le denomina «abierto».

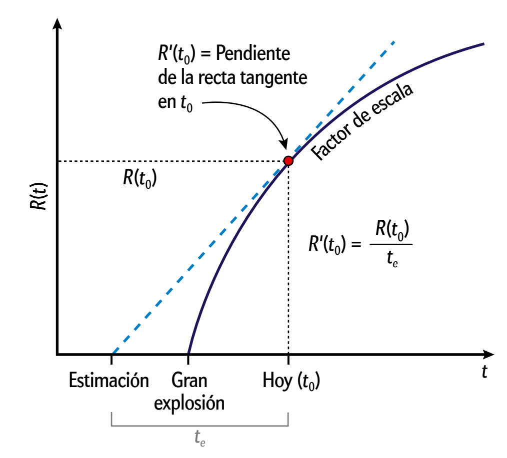
La teoría muestra que en los tres modelos hay un comienzo: un instante en el que todos los puntos del cosmos se encontraban a distancia nula unos de otros. A partir de esta singularidad, como la llaman los matemáticos, el universo empezó a crecer. En aquel momento aparecieron literalmente el espacio y el tiempo.

Sin embargo, el futuro del universo es muy distinto en cada modelo. Un universo abierto se expandirá para siempre; uno plano se ralentizará poco a poco pero sin que su velocidad llegue nunca a anularse del todo, y uno cerrado alcanzará un tamaño máximo, a partir del cual volverá a caer sobre sí mismo hasta contraerse de nuevo en una singularidad.

¿Con cuál de los tres modelos se corresponde nuestro universo? La respuesta depende de la densidad promedio de materia y energía del cosmos. Este parámetro presenta un valor crítico para el cual el universo es plano. Si la densidad real supera dicho valor, llegará un día en que la atracción gravitatoria vencerá a la expansión y el universo colapsará. En caso contrario, la materia y la energía no bastarán para frenar la expansión cósmica y el universo continuará hinchándose para siempre.

El principio de todas las cosas

¿Hasta qué punto se corresponden las métricas de FRW con la realidad? ¿Podemos deducir algo a partir de ellas que quepa verificar mediante observaciones astronómicas?



TIEMPO DE HUBBLE: La variación del factor de escala permite obtener una estimación al alza de la edad del universo aun sin conocer la forma funcional de $R(t)$. Un cálculo sencillo muestra que el universo no puede ser más antiguo que el inverso de la constante de Hubble, una cantidad conocida como «tiempo de Hubble».

La métrica de FRW nos permite calcular la distancia espacial $d(t)$ entre dos puntos del universo (dos galaxias, por ejemplo) en un instante t de la evolución cósmica. Para ello, en la métrica basta con tomar t constante (y, por tanto, $dt = 0$), a partir de lo cual obtenemos:

$$d(t) = \frac{R(t)}{1+\frac{kr^2}{4}}\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz}.$$

Por otro lado, la velocidad relativa entre dos galaxias será igual a la derivada con respecto al tiempo de la distancia $d(t)$ que las separa. Lo importante es que toda la dependencia temporal se encuentra encerrada en el factor de escala. Así pues, a partir de la expresión anterior llegamos a:

$$v(t) = d'(t) = \frac{R'(t)}{1+\frac{kr^2}{4}}\sqrt{dx^2 + dy^2 + dz},$$

donde la prima indica la derivada con respecto al tiempo. Por último, dividiendo ambas ecuaciones y despejando la velocidad, tenemos:

$$v(t) = \frac{R'(t)}{R(t)}d.$$

Esta relación nos está diciendo que, en un instante de tiempo dado, la velocidad a la que se alejan dos galaxias es proporcional a su distancia. Así pues, las métricas de FRW implican la ley de Hubble. El coeficiente de proporcionalidad, $H = R'(t)/R(t)$, es la «constante» de Hubble, que en realidad depende de la edad del universo. El valor que hoy miden los astrónomos corresponde al momento cósmico actual, t_0: $H_0 = R'(t_0)/R(t_0)$.

Aun sin conocer el factor de escala $R(t)$, la constante de Hubble nos permite deducir muy fácilmente una cota para la edad del universo. Si atendemos a la gráfica adjunta, vemos que $R'(t_0) = R(t_0)/t_e$, donde t_e nos proporciona una estimación al alza del tiempo que ha transcurrido desde la gran explosión. En particular:

$$t_e = R(t_0)/R'(t_0) = 1/H_0.$$

Es decir, el inverso de la constante de Hubble en la actualidad impone una cota superior a la edad del universo.

Los datos más recientes arrojan una constante de Hubble de unos 70 kilómetros por segundo por megapársec (dos galaxias que disten un megapársec se alejarán a una velocidad de 70 kilómetros por segundo), lo que implica una cota de unos 14.300 millones de años. Nada mal: a partir de consideraciones más complejas, la verdadera edad del universo se estima hoy en unos 13.800 millones de años.

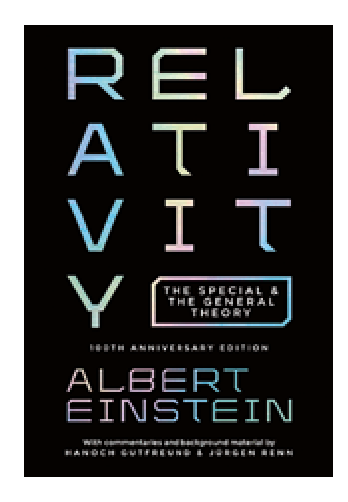
Los valores experimentales de H_0 corresponden al ritmo actual de expansión cósmica. Pero ese ritmo parece haber cambiado a lo largo del tiempo. Numerosas pruebas apuntan a que la expansión del universo se está acelerando: un nuevo rompecabezas para los cosmólogos, que intentan solucionarlo con energía oscura, partículas exóticas o las propiedades del vacío cuántico. Aun así, la estimación al alza que hemos derivado sigue siendo válida, ya que una aceleración supondría un universo aún más joven. Como sospechó Poe, nuestro universo tal vez sea muy viejo, pero no es infinitamente viejo.

PARA SABER MÁS

Eureka. Edgar Allan Poe. Alianza Editorial, 2003.
Cosmología física. Jordi Cepa. Editorial Akal, 2007.
Astrobiología: Un puente entre el big bang y la vida. B. Luque, F. Ballesteros, A. Márquez, M. González y L. Lara. Editorial Akal, 2009.

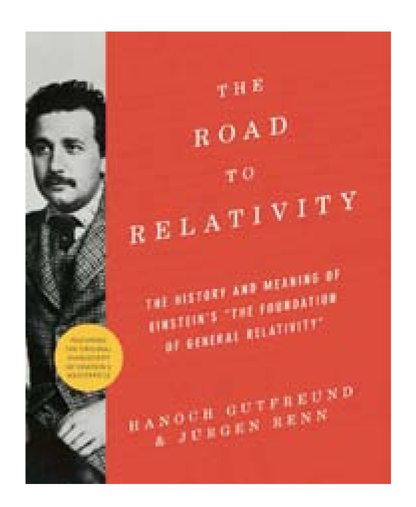
EN NUESTRO ARCHIVO

La constante de Hubble y el universo en expansión. Wendy Freedman en *IyC*, junio de 2004.
La constante cosmológica. Lawrence M. Krauss y Michael S. Turner en *IyC*, noviembre 2004.



RELATIVITY: THE SPECIAL AND THE GENERAL THEORY (100TH ANNIVERSARY EDITION).

Albert Einstein. Princeton University Press, 2015.



THE ROAD TO RELATIVITY: THE HISTORY AND MEANING OF EINSTEIN'S «THE FOUNDATION OF GENERAL RELATIVITY» FEATURING THE ORIGINAL MANUSCRIPT OF EINSTEIN'S MASTERPIECE.

Hanoch Gutfreund y Jürgen Renn. Princeton University Press, 2015.

Centenario de la relatividad general

Cómo presentaban la teoría el propio Einstein y otros científicos

No hace tanto, los relativistas eran pocos y a menudo autodidactas. La relatividad general tenía todavía el estigma de ser esotérica, sin objeto y, la verdad, muy difícil. Había lugares donde se podían encontrar cursos de doctorado especializados, pero, en general, si a uno le interesaban lo más mínimo los universos en expansión y los agujeros negros, tenía que valerse de sus propios medios. Eso me pasó a mí.

Estudié ingeniería y no disfruté mucho. Pero durante el curso de electromagnetismo descubrí el mundo de la relatividad especial de Albert Einstein. Las matemáticas eran seductoras. Las paradojas dejaban atónito. Y me dispuso para aprender su teoría general de la relatividad, según la cual la fuerza gravitacional no es sino el curvarse y deformarse del espaciotiempo, que responde a la presencia de energía y masa. Para entender este punto de vista revolucionario, tuve que buscar el libro adecuado, algo que me guiase a través de las complejidades de la geometría riemanniana, que revoca las reglas de la geometría euclídea que aprendemos en el colegio. Pero tenía que entender, además, la física: la curvatura de la luz y la órbita de Mercurio.

Un libro destacaba: el de divulgación del propio Einstein, *Sobre la relatividad especial y general.* Se publicó en Alemania en 1916, tras el fundacional artículo de Einstein de 1915 sobre la teoría general de la relatividad, y se tradujo al inglés en 1920. En 2015 vemos la publicación de una edición especial en inglés para celebrar el centenario (*Relativity: The special and the general theory*), así como la de una versión anotada del manuscrito del artículo (*The road to relativity*), de Hanoch Gutfreund y Jurgen Renn.

Se suponía que *Sobre la relatividad*, el libro de Einstein, aunque comprensible para cualquiera, tenía las matemáticas suficientes para que el lector más formado llegase al meollo de sus ideas. En realidad exhibe muy pocas ecuaciones; resulta así menos explicativo y más ilustrativo. Pero palabras hay muchas, sin duda. Einstein se puso la tarea de explicar los conceptos e ideas en que se basa su teoría mediante situaciones de la vida cotidiana, como trenes que se mueven sobre terraplenes y relojes a bordo y en tierra. Su prosa está atemperada con algunas consideraciones filosóficas; discute, por ejemplo, la suposición a priori de que existe el espacio vacío.

No sé si atreverme a decir que me pareció que la prosa no era elegante. Me cogió por sorpresa. Había leído algunos de los artículos que Einstein publicó en 1905, entre ellos el que formulaba la relatividad especial, y los tenía por joyas. *Sobre la relatividad*, en cambio, no era especialmente claro y sí un poco romo. Einstein anunciaba en la introducción que se iba a repetir con frecuencia, «sin prestar la menor atención a la elegancia de la presentación». Puede que ahí siguiese la máxima del físico Ludwig Boltzmann, quien precisó el concepto de entropía y declaró que las «cuestiones de elegancia hay que dejárselas al sastre y al zapatero». No obstante, el intento de Einstein de escribir de modo popular produce una sensación de franqueza, porque no esquiva las dificultades. Su teoría entera estaba, en cierta medida, en el libro, pero el tratamiento no parecía funcionar, y él lo sabía. Le comentó a un amigo, el ingeniero suizo-italiano Michele Besso, que el libro era «bastante acartonado». Años más tarde, bromearía diciéndole al físico polaco Leopold Infeld que la inscripción de la portada, «comúnmente comprensible», debería cambiarse por «comúnmente incomprensible».

Tras rendirme con Einstein, busqué qué más había y di con mucho donde elegir. En cuanto Einstein sacó su teoría, otros la tomaron e hicieron suya. Arthur Eddington, el astrónomo británico que midió la curvatura de la luz en 1919 durante una expedición para observar un eclipse, escribió en 1923 un tratado matemático sobre la teoría del espaciotiempo, bellamente elaborado. Erwin Schrödinger, uno de los padres de la física cuántica, presentó en 1950 su versión, más conceptual, en *La estructura del espaciotiempo.* La reservada personalidad de otro pionero cuántico, Paul Dirac, se refleja en las notas de su disertación sobre la teoría: menos de setenta páginas publicadas en 1975 como *La teoría general de la relatividad.* Euforia y creatividad brotan de las 1200 páginas de la gigantesca *Gravitación,* obra de 1973 de John Archibald Wheeler y sus discípulos Charles Misner y Kip Thorne. No sabía con cuál quedarme.

Aunque nunca me valí de él, el libro de Einstein seguiría presentándose en mi vida. Como siento una inclinación por las librerías de viejo, he ido encontrando traducciones, cada una con su propia historia. La versión francesa se debió primero a Jeanne Rouvière, protegida del matemático y político Emile Borel, y luego la amplió Maurice Solovine, amigo de Einstein. El matemático Tullio Levi-Civita, cuya obra influyó mucho en que Einstein se viese atraído por la geometría riemanniana, recomendó a un ingeniero, Giuseppe Luigi Calisse, para que lo tradujese al italiano. De la traducción al

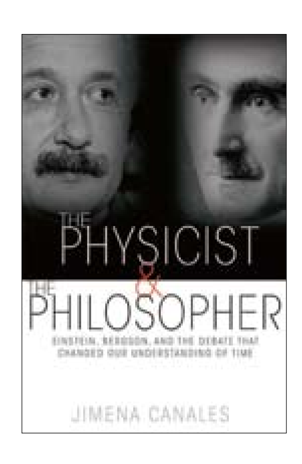
ruso se encargó el lógico y filósofo judío Gregorius Itelson, que vivía en Berlín y murió en 1926 a consecuencia de la paliza que le dio una turba antisemita.

Hoy, el libro de Einstein es una curiosidad histórica. No creo que nadie lo lea todavía de la manera que él pretendía. Ha habido tantos intentos de divulgar la teoría, de especialistas y de periodistas, que cualquiera podrá encontrar un libro que sea de su gusto. Y en el siglo que ha pasado desde su publicación hemos aprendido mucho: un libro de divulgación sobre la relatividad tendrá hoy que hablar del universo en expansión y de la gran explosión, de los agujeros negros y de las singularidades. Estas exóticas predicciones de la relatividad general, de las que Einstein desconfió en un principio, han robado toda la atención.

Sin embargo, aún puedo verle alguna magia fugitiva a *Sobre la relatividad*, pese a su tono «acartonado». Nos evoca a Einstein como el oráculo que presenta una teoría al mundo, una de las teorías más revolucionarias y profundas de todos los tiempos.

—Pedro Ferreira
Universidad de Oxford

Reseña original publicada en *Nature*, vol. 520, págs. 621-622, 2015. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2015



THE PHYSICIST AND THE PHILOSOPHER. EINSTEIN, BERGSON, AND THE DEBATE THAT CHANGED OUR UNDERSTANDING OF TIME.

Jimena Canales. Princeton University Press, Princeton, 2015.

Ciencia y filosofía, ¿un diálogo de sordos?

El tiempo de Einstein y el Tiempo de Bergson

En el centenario de la publicación de la teoría de la relatividad general, el físico Albert Einstein vuelve a las portadas. Documentales, exposiciones y libros le atribuyen haber ligado inseparablemente el tiempo y el espacio, superando la concepción newtoniana de la gravitación. Una revolución que convirtió a Einstein en un icono pop del genio científico y que está en la base de la astrofísica y cosmología modernas. La cosa parecería merecer el máximo reconocimiento a la labor científica, el premio Nobel. Sin embargo, no fue así.

En 1921 Einstein obtuvo el Nobel por su artículo de 1905 sobre el efecto fotoeléctrico, pero no por las teorías de la relatividad especial y general. El presidente del jurado sueco atribuyó explícitamente tal decisión a las dudas vertidas por el filósofo francés Henri Bergson sobre la cientificidad de las conclusiones que Einstein extraía acerca del tiempo. Para Bergson, la decisión del jurado suponía la aceptación pública por los popes de la física de que la filosofía tenía un terreno propio que la física no podía ocupar. Todo un éxito, teniendo en cuenta que la institución no considera premiable a la filosofía (en 1928 el propio Bergson obtuvo el Nobel... de literatura).

Como explica Jimena Canales en su libro sobre el debate Einstein-Bergson, la victoria de Bergson fue pírrica y contribuyó a su propio descrédito y progresivo olvido en proporción inversa a la que crecían la fama y el prestigio de Einstein. Paralelamente, el prestigio de la ciencia ha eclipsado en estos últimos cien años al de la filosofía académica iniciada por Platón. Pero ¿cuáles eran las objeciones de Bergson y qué significado pueden tener en nuestros días?

The physicist and the philosopher reconstruye al detalle el contexto del debate que el físico y el filósofo mantuvieron en París el 6 de abril de 1922. Einstein, y tras él muchos comentaristas, reconstruyó la posición de Bergson como producto de su supuesta falta de conocimientos físicos y matemáticos. Pero, como demuestra Canales, Bergson estudió y entendió las ecuaciones de Einstein, sobre todo las de la relatividad especial, y las aceptó, aunque solo para determinadas condiciones. Lo que el francés objetaba era la extrapolación de las ecuaciones relativistas a terrenos ajenos a la física, en especial a la idea de simultaneidad. En *Duración y simultaneidad,* publicado al poco del debate de París, Bergson recurrió a las mayúsculas para explicar que lo que no admitía era el secuestro de la idea filosófica de Tiempo por el concepto físico de tiempo.

Para Einstein, la simultaneidad se establecía objetivamente por la coordinación entre dos relojes. Cualquier otra aproximación era subjetiva y psicológica y, por tanto, ilusoria, como según él lo era la propia flecha del tiempo. Para Bergson, en cambio, existían determinaciones biológicas, psicológicas e históricas que el concepto físico no podía contener ni reducir. Si el sujeto observador del tren y el sujeto observador del andén eran de carne y hueso, no responderían a las ecuaciones relativistas. Una filosofía del tiempo debía tener en cuenta no solo el concepto físico, sino los resultados de otras disciplinas. Para Einstein, el único concepto objetivable era el físico y la tarea del filósofo era amoldar otras concepciones del tiempo a los nuevos resultados relativistas. Desde entonces, el debate sobre las relaciones entre la ciencia y la filosofía se repite periódicamente. La filosofía parece destinada o bien a glosar y divulgar nuevos resultados científicos o a perderse en especulaciones metafísicas de espaldas a la ciencia. ¿Hay salida a este diálogo de sordos? [*Véase* «Física y filosofía», por Francisco José Soler Gil; Investigación y Ciencia, julio de 2013.]

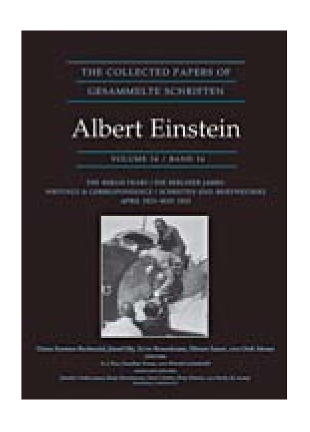
Canales propone dar un paso atrás y estudiar la historia de esta oposición y los contextos en los que surgió. En su relato, la oposición misma se disuelve, no sirve para dar cuenta de la masa de fenómenos en liza y parte de presupuestos falsos. Para empezar, no hay una Ciencia con mayúsculas cuyos resultados estén unificados. Tampoco «la filosofía» existe como tal, sino que hay múltiples sistemas de ideas incompatibles entre sí. Los conceptos científicos y las ideas filosóficas forman una trama inseparable. *The physicist and the philosopher* es una historia no maniquea de la dicotomía de las dos culturas, del «¿eres de ciencias o de letras?». La profesora de la Universidad de Illinois, licenciada en física en México y doctora en historia por Harvard, es la persona indicada para la

tarea. Su primer libro (*A tenth of a second*, 2009) también analizaba las transformaciones de la idea de tiempo en diversas disciplinas científicas y técnicas a finales del siglo XIX y principios del XX. Y ha dedicado numerosos artículos a las conexiones entre innovaciones tecnológicas e ideológicas, algunos disponibles en español.

En esta ocasión, a lo largo de más de 400 páginas escritas con contundente claridad y elegancia, Canales nos introduce por los entresijos del debate, sus precedentes y sus consecuencias. La primera parte traza las líneas del campo de batalla e introduce al lector en la complejidad de las posiciones; y no solo respecto al problema del tiempo, puesto que los dos personajes provenían de tradiciones educativas, científicas y políticas muy distintas. La segunda parte del libro, la más larga, profundiza en los contextos científicos, sociológicos, ideológicos e incluso religiosos del debate y en su inmensa repercusión. Nos recuerda Canales que físicos de la talla de Poincaré, Lorentz o Michelson estaban más cerca de Bergson, mientras que filósofos como Russell se inclinaban por la posición de Einstein. En *La filosofía de Bertrand Russell*, Javier Pérez Jara ha situado admirablemente la posición de Russell sobre este tema en el conjunto de su sistema. La tercera parte del libro de Canales es, sin duda, la más original. Indaga en los cambios tecnológicos que, de un modo u otro, intervinieron en el debate: relojes, telégrafos, radio, cinematógrafos y otros muchos nuevos aparatos que obligaban a revisar conceptos e ideas tradicionales y ante los que Einstein y Bergson reaccionaron de manera a veces sorprendentemente similar.

A pesar de los años transcurridos y los importantes desarrollos ocurridos desde entonces, somos herederos del debate entre Einstein y Bergson. Tanto en lo concerniente al concepto científico-categorial de tiempo y la idea filosófica de Tiempo, como en lo relativo a la formulación de la pregunta sobre el diálogo entre ciencia y filosofía. Una pregunta que, como repite la autora, suele estar mal planteada.

—Lino Camprubí
Instituto Max Planck
para la Historia de las Ciencias, Berlín



ALBERT EINSTEIN. VOLUME 14. THE BERLIN YEARS: WRITINGS & CORRESPONDENCE, APRIL 1923-MAY 1925.

Dirigido por Diana Kormos Buchwald, József Illy, Ze'ev Rosenkranz, Tilman Sauer y Osik Moses. Princeton University Press, Princeton, 2015.

Einstein

Primeras reflexiones sobre la relatividad

El siglo XX fue testigo privilegiado de las dos revoluciones más importantes que haya conocido la explicación física del mundo: la teoría de la relatividad y la mecánica cuántica. Solo una mente excepcional pudo percatarse de la constitución profunda de la naturaleza y poner cimientos roqueños de ambas. Aconteció en el año 1905. En el legado se incluían nociones de espacio y tiempo, de materia y energía, que disuenan con nuestra experiencia diaria.

A los dieciséis años, Einstein soñaba ya con cazar la luz. Razonaba que, si corría más deprisa que ella, la luz se le ofrecería como un patrón ondulatorio de campos eléctricos y magnéticos congelados en el tiempo; pero algo así no presentaba visos de existir. Diez años más tarde, el sueño tomó cuerpo en la teoría especial de la relatividad, que prohíbe captar la luz, supera la concepción clásica de espacio y tiempo y echa los cimientos de la física moderna.

Entre marzo y septiembre de 1905, Einstein escribió cinco artículos en *Annalen der Physik* que ejercieron una influencia determinante en la física posterior. A partir de consideraciones entrópicas, argumentaba que la luz constaba de cuantos; disertaba sobre la determinación de las dimensiones moleculares; expuso su teoría del movimiento browniano; avanzó la teoría de la relatividad especial e introdujo la derivación de $m = E/c^2$.

El movimiento browniano, descubierto en 1828, remite al movimiento aleatorio de partículas en suspensión. Los cálculos de Einstein aportaron la prueba más directa y el fenómeno fue confirmado experimentalmente en 1908 por Perrin. Einstein abordó el efecto fotoeléctrico a través de la naturaleza de la radiación electromagnética en el contexto de las ecuaciones de Maxwell. Supuso que la energía lumínica se transmitía en paquetes discretos, los cuantos de Planck. En 1905, los físicos creían que el espacio constituía un gran marco en el que se desarrollaba el relato del universo y que el tiempo unía a todos los actores en un mismo compás. Al negar todo ello, la relatividad especial sustituía un espacio y un tiempo entendidos como entidades distintas en una sola entidad, el espaciotiempo. Combinada con la mecánica cuántica, la teoría especial de la relatividad ayudaba a explicar la estabilidad de la materia (requiere incluso la existencia de antimateria).

Einstein fue aplaudido como el nuevo Copérnico. Si el astrónomo polaco nos sacó del centro del universo para alojarnos en la periferia, Einstein revolucionó nuestros conceptos de espacio y tiempo. Pasaron más de cien años hasta que la idea de Copérnico de un universo centrado en el Sol calara en la cultura general. No hemos de extrañarnos, pues, de que las nociones einsteinianas de espacio y tiempo no acaben de integrarse en nuestra manera habitual de pensar. Seguimos viviendo en un mundo newtoniano. Percibimos todavía el espacio como una suerte de cuadro en cuyo interior vivimos y nos movemos.

El concepto fundamental de la relatividad de Einstein era que los observadores en movimiento podían considerarse a sí mismos en reposo. Primero exploró esa noción en el caso del movimiento uniforme. Los observadores que se mueven en línea recta a velocidad constante se someterán a las mismas leyes de la física. Los observadores en movimiento relativo no estarán de acuerdo en la simultaneidad de los acontecimientos; discreparán a propósito de la longitud de los objetos en la dirección de movimiento y sobre las velocidades de los relojes. Nada puede moverse más deprisa que la velocidad de la luz. Energía y masa son equivalentes. La materia es energía hecha manifiesta.

Cinco años después de que escribiera su primer artículo sobre la relatividad, los astrónomos comenzaron a debatir las implicaciones de la misma en la gravitación y en la mecánica newtoniana. En 1911, Einstein publicó nuevos cálculos, basados en el principio de equivalencia, prediciendo ciertos efectos astronómicos mensurables. Los tests de tales predicciones se apoyaban en técnicas refinadas de fotografía astronómica y espectrografía.

Einstein extendió su principio de relatividad a movimientos acelerados y terminó con una teoría de la gravitación radicalmente diferente de la propuesta por Newton. La energía-masa distorsiona el espaciotiempo. Los planetas se mueven en órbitas a lo largo de trayectorias curvas bajo la influencia de cualquier fuerza. Einstein publicó su teoría general de la relatividad en 1915, en los días negros de la Primera Guerra Mundial. Contenía tres predicciones, todas ellas de carácter astronómico. Una explicaba con nitidez la anomalía persistente de la órbita medida de Mercurio. Las otras dos eran el corrimiento al rojo de líneas espectrales emitidas por grandes cuerpos gravitantes y la desviación de la trayectoria de la luz en un campo gravitatorio, que se dejaba observar como un desplazamiento centrífugo de las estrellas en la vecindad del Sol en eclipse. Muy pronto los astrónomos verificaron la predicción de la desviación de la luz. Su anuncio catapultó a Einstein y su teoría a la cúspide de la fama mundial. En pocos años, los astrónomos mostraron que el tercer efecto existía en el Sol.

En 1921 le concedieron el Nobel de física por el trabajo de 1905 «Sobre un punto de vista heurístico concerniente a la producción y transformación de la luz», el efecto fotoeléctrico, donde cuestionaba la teoría ondulatoria de la luz y sugería que podía entenderse también como un conjunto de partículas, lo que abría las puertas al mundo de la física cuántica. La fama internacional de Einstein realzó la valoración de la ciencia alemana. Deliberadamente aprovecha su popularidad para difundir causas políticas (sionistas) y promover el conocimiento científico, que él reputa inextricablemente unidos, como en el caso de la fundación de la Universidad Hebrea de Jerusalén. La política, razona, no debe inmiscuirse en asuntos de la ciencia, ni los individuos son responsables de la acción del Estado.

Las epístolas reflejan el estado de la ciencia. Repárese en su relación con Hermann Weyl o con Hendrik A. Lorentz. Al primero le envía las pruebas del artículo sobre la función hamiltoniana generalizada, ponderando la versión que da. Con motivo del septuagésimo cumpleaños del segundo le escribe (15 julio de 1923): «Me encuentro profundamente vinculado a usted, mi maestro en asuntos de ciencia, cuyos pasos he seguido y conducen al factor más importante de mi vida. Y no solo en ciencia, sino también en asuntos humanos, en los que usted es un modelo ideal».

Pero el volumen incluye, entre otros ensayos, la conferencia sobre «Ideas y problemas fundamentales de la teoría de la relatividad», dictada en julio de 1923 en Gotenburgo, una primera valoración de sus ideas innovadoras. El desarrollo entero de la teoría, afirma, gira en torno a la cuestión de si existen o no en la naturaleza dos estados de movimiento físicamente distintos. Otro tema clave es el postulado de realidad de conceptos y distinciones.

Ambos aspectos nos resultan cristalinos si los aplicamos a un caso particular: la mecánica clásica. En primer lugar, observamos que, en cada punto ocupado por materia, existe un estadio privilegiado de movimiento, a saber, el movimiento de la materia en el punto observado. Pero el problema empieza con la cuestión de si existen estados de movimiento físicamente preferidos con respecto a regiones extensas. Para Einstein solo podemos pensar en el movimiento como movimiento relativo entre cuerpos. En mecánica, cuando uno habla de movimiento per se, está hablando de movimiento con respecto a un sistema de coordenadas. Esta interpretación no se ajusta al postulado de realidad, aun cuando el sistema de coordenadas se considere un mero constructo mental. En física experimental, el sistema de coordenadas corresponde siempre a un cuerpo rígido. Se parte, además, del supuesto de que tales cuerpos rígidos permiten ser orientados al resto de los cuerpos, como los cuerpos de la geometría euclídea.

La teoría especial de la relatividad es una adaptación de los fundamentos de la física a la electrodinámica de Maxwell-Lorentz. De la física que le precedió toma la idea de validez de la geometría euclídea para las posiciones posibles de cuerpos rígidos, el marco inercial y la ley de inercia. Da por válido, para la física entera, el principio de equivalencia de los marcos inerciales en la formulación de las leyes de la naturaleza (principio de relatividad especial). De la electrodinámica de Maxwell y Lorentz toma el postulado de la constancia de la velocidad de la luz en un vacío (principio de luz).

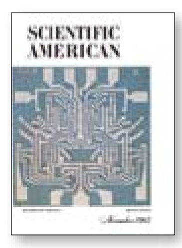
Las leyes de transformación para las coordenadas de espacio y de tiempo para la transición de un marco inercial a otro, las así llamadas transformaciones de Lorentz, vienen inequívocamente determinadas por esas definiciones y las hipótesis inherentes en el supuesto de que se encuentren libres de contradicción. El contenido físico inmediato de estas transformaciones descansa en el efecto del movimiento en relación con el marco inercial utilizado en forma de cuerpo rígido (contracción de Lorentz) y descansa también sobre la velocidad de los relojes. De acuerdo con el principio especial de la relatividad, las leyes de la naturaleza han de ser covariantes con respecto a las transformaciones de Lorentz; la teoría aporta, pues, un criterio para las leyes generales de la naturaleza. En particular, conduce a una modificación de la ley newtoniana del movimiento de un punto, en la que la velocidad de la luz en el vacío figura como velocidad limitante; y conduce a la idea de una igualdad esencial entre energía y masa inercial.

La teoría especial de la relatividad comportó avances sustanciales. Reconcilió la mecánica con la electrodinámica. Redujo el número de hipótesis de esta última mutuamente independientes. Potenció el esclarecimiento epistemológico de los conceptos fundamentales. Unificó las leyes del momento y de la conservación de la energía. Demostró la unidad esencial de masa y energía. Con todo, no resulta plenamente satisfactoria, aparte de los problemas cuánticos.

Newton reconocía ya que la ley de inercia era insatisfactoria. A los cuerpos materiales observables los hacía responsables del comportamiento gravitatorio de un punto material, pero no señalaba ninguna causa material del comportamiento inercial del punto material, sino que ofrecía solo una causa ficticia de ello. Eso no era lógicamente recusable, pero resultaba insatisfactorio. Por ese motivo, Mach reclamaba una modificación de la ley de inercia, de suerte que la inercia se concibiera como resistencia a la aceleración por cuerpos entre sí y no frente a un espacio. Esta interpretación comporta la esperanza de que los cuerpos acelerados posean una acción acelerada concordante sobre otros cuerpos (inducción de aceleración). La relatividad general elimina la separación entre efectos inerciales y efectos gravitatorios.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



Noviembre 1965

El corazón artificial

«Hasta hace muy pocos años, los esfuerzos orientados a implantar un corazón artificial en el cuerpo humano no se consideraban genuinamente científicos ni dignos de apoyo, y los artículos acerca de la experimentación en ese terreno no eran aceptados por las sociedades científicas ni médicas. Pero desde hace cinco años las cosas han cambiado. Se han realizado experimentos con perros y terneros a los que se ha mantenido vivos muchas horas tras haberles sustituido el corazón natural del tórax por una bomba artificial. En varios laboratorios los investigadores disponen ya de distintos modelos de corazones artificiales. El Instituto Nacional de Cardiología de EE.UU. respalda esos trabajos mediante contratos con la industria para el desarrollo de los dispositivos.»

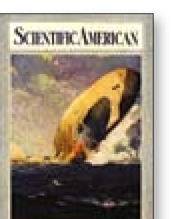
Manipulaciones

«En el caso Baker contra Carr, en su histórico fallo de noviembre de 1962, el Tribunal Supremo de EE.UU. daba a entender que la Constitución impide toda desigualdad derivada de las diferencias de población entre los distritos legislativos de cada estado. El Tribunal ha detallado en parte su opinión acerca de lo que requiere la "igualdad entre poblaciones": en cada estado la distribución de escaños entre los distritos debe organizarse de modo que el número de habitantes por legislador sea sustancialmente el mismo en todos los distritos. En muchos estados no tardó en hacerse patente que la regulación de la representación legislativa era un paraíso de la desigualdad. El premio se lo llevó el estado de Vermont, donde se descubrió que los distritos más poblados poseían una población 987 veces mayor que los menos poblados.»



LA BALANZA DE INDUCCIÓN: permite hallar proyectiles sin estallar en los campos de Francia que fueron escenarios de batallas, 1915.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CXIII, N.º 20, 13 DE NOVIEMBRE DE 1915



Noviembre 1915

Ferrocarriles eléctricos

«Como última novedad en la electrificación de las líneas de ferrocarriles de vapor, la compañía Ferrocarriles de Chicago, Milwaukee y Saint Paul está electrificando más de 700 kilómetros de su red transcontinental de servicios directos entre Chicago, Milwaukee, Saint Paul, Minneapolis y la costa norte del Pacífico. La corriente para las locomotoras del tramo inaugural de esta electrificación procede de las centrales hidroeléctricas de Montana.»

Detección de granadas enterradas

«En los antiguos campos de batalla de Europa que son recuperados para la pacífica actividad agrícola existe un riesgo de muerte omnipresente para los labradores y los caballos debido al posible contacto de las rejas de los arados con granadas de artillería no estalladas. El aparato ideado por los franceses para detectar proyectiles enterrados es una adaptación de la balanza de inducción de Hughes. El aparato original fue construido por el profesor C. Gutton por encargo del prefecto del departamento de Meurthe-et-Moselle (de la región de Lorena) y con él el constructor logró detectar la presencia de una granada de pequeño calibre a una profundidad de unos 40 centímetros.»

Francia y Bélgica aún eliminan más de 100 toneladas al año de proyectiles no estallados de esos campos de batalla ya centenarios.



Noviembre 1865

La vida en otros sistemas solares

«El profesor Miller y el señor Huggins han construido un instrumento con el que han comparado los espectros de la Luna y los planetas, así como de varias estrellas fijas, e incluso de las nebulosas, con los espectros de algunos de los principales metales. Los autores de estas valiosas comunicaciones observan "que los elementos de mayor presencia en el enjambre de estrellas son algunos de los más estrechamente relacionados con los constituyentes de los seres vivos de nuestro planeta, como el hidrógeno, el sodio, el magnesio y el hierro". En conjunto, nos parece que las anteriores observaciones espectrales sobre las estrellas pudieran contribuir de algún modo a dotar de base experimental a una conclusión, por ahora simplemente especulativa, como es la de que las estrellas más brillantes son, como nuestro Sol, el sostén y la fuente energética de sistemas de mundos aptos para acoger vida.»



INFORME ESPECIAL | ESTADO DE LA CIENCIA GLOBAL 2015

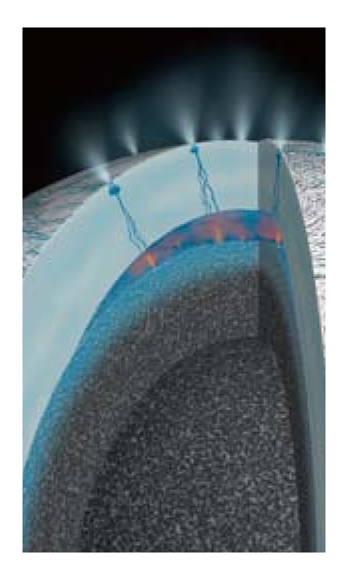
GRAN CIENCIA PARA GRANDES RETOS

Infografía sobre los principales megaproyectos científicos
La redacción

Las dificultades del Proyecto Cerebro Humano
Stefan Theil

Evaluación científica de los programas contra la pobreza
Dean Karlan

Ciencia para reducir el crimen. La experiencia colombiana
Rodrigo Guerrero Velasco



VIDA EXTRATERRESTRE

Agua caliente en las profundidades de Encélado

Frank Postberg y Thorsten Dambeck

El hallazgo de un océano en la luna helada de Saturno sugiere la posibilidad de que en el satélite se den las condiciones favorables para albergar vida.

NEUROCIENCIA

La importancia del sueño

Robert Stickgold

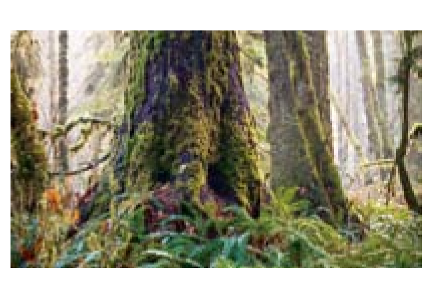
Cómo influye en los sistemas nervioso, inmunitario y endocrino.

ECOLOGÍA

Promover la adaptación de los bosques al cambio climático

Hillary Rosner

Mediante la incorporación de variedades de árboles mejor adaptadas, los bosques más amenazados podrían hacer frente a las nuevas condiciones.



INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
NEWS EDITOR Robin Lloyd
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Josh Fischmann, Seth Fletcher, Christine Gorman, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN

para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Tel. 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona

PUBLICIDAD
NEW PLANNING
Javier Díaz Seco
Tel. 607 941 341
jdiazseco@newplanning.es

Tel. 934 143 344
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Tel. 934 143 344 - Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	75,00 €	110,00 €
Dos años	140,00 €	210,00 €

Ejemplares sueltos: 6,90 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Andrés Martínez: *Apuntes*; Juan Pedro Adrados: *Apuntes*; Fabio Teixidó: *La travesía del hierro desde el abismo*; Juan Pedro Campos: *Una sorpresa con los gases de invernadero*, *100 años de relatividad general*, *La importancia de Einstein* y *Centenario de la relatividad general*; Carlos Lorenzo: *El ADN antiguo arroja luz sobre el debate de las lenguas indoeuropeas*; Xavier Roqué: *Einstein y la invención de la realidad*; Miguel A. Vázquez Mozo: *Los errores de Einstein*; Noela Fariña: *Los experimentos mentales de Einstein*; Tomás Ortín: *Una breve historia de los viajes en el tiempo*; Javier Grande: *La prueba del agujero negro*; Alberto Ramos: *La búsqueda de la teoría final*; Ernesto Lozano Tellechea: *Sobre la teoría generalizada de la gravitación*; J. Vilardell: *Hace...*

ISSN edición impresa 0210-136X Dep. legal: B-38.999-76
ISSN edición electrónica 2385-5665

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. de Caldes, km 3 08130 Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España